

塩害によって腐食したコンクリート中鉄筋の  
腐食メカニズムおよび電気防食基準に関する実験的研究

Corrosion Mechanism and Cathodic Protection Criteria  
for Reinforcing Bars of RC Members Deteriorated  
by Chloride Attack

2012 年 2 月

早稲田大学大学院 理工学研究科

山本 悟

# 目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	2
第2章 既往の研究	7
2.1 はじめに	7
2.2 コンクリート中鉄筋の電位に関する平衡論的研究	7
2.3 コンクリート中鉄筋の腐食速度に関する速度論的研究	10
2.4 塩害によるコンクリート中鉄筋の腐食メカニズム	12
2.5 コンクリート中鋼材の電気防食基準	13
2.5.1 電気防食の原理	13
2.5.2 電気防食効果の確認方法	13
2.5.3 現在の電気防食基準	14
2.6 まとめ	16
第3章 実験概要	19
第4章 単鉄筋供試体による防食基準の検討	21
4.1 実験目的	21
4.2 実験方法	21
4.2.1 供試体	21
4.2.2 アノード溶解処理	22
4.2.3 暴露条件	22
4.2.4 通電方法	23
4.2.5 実験期間	23
4.2.6 供試体の種類	24
4.2.7 測定項目	25
4.3 実験結果および考察	26
4.3.1 自然電位におよぼすさび層および湿潤条件の影響	26
4.3.2 湿潤条件に適した防食基準の検討	28
4.3.3 供試体解体調査の結果	31
4.3.4 鉄筋近傍のコンクリート中塩化物イオン濃度	34
4.4 まとめ	35

第5章 複鉄筋供試体による腐食メカニズムおよび電気防食効果の検討	37
5.1 実験目的	37
5.2 実験方法	37
5.2.1 供試体	37
5.2.2 鉄筋のアノード溶解処理	39
5.2.3 実験期間	39
5.2.4 暴露条件	39
5.2.5 通電方法および測定項目	40
5.3 実験結果および考察	44
5.3.1 アノード溶解処理	44
5.3.2 単独鉄筋供試体による実験結果	44
5.3.3 マクロセル供試体による実験結果	48
5.3.4 防食電位と防食効果についての考察	52
5.3.5 コンクリートの物性に関する結果	54
5.3.6 電気防食の二次的効果	55
5.3.7 分極曲線による腐食速度に関する考察	58
5.3.8 モデル化による腐食メカニズムの解明	59
5.4 まとめ	63
第6章 模擬干満帯供試体による流電陽極の影響の検討	65
6.1 実験目的	65
6.2 実験方法	65
6.2.1 供試体の形状寸法	65
6.2.2 供試体の使用材料	65
6.2.3 鉄筋のアノード溶解処理	66
6.2.4 暴露条件および供試体の種類	66
6.2.5 暴露期間および測定項目	66
6.3 実験結果および考察	68
6.3.1 電位の経時変化	68
6.3.2 電流の経時変化	68
6.3.3 1日間の電位変化	69
6.3.4 1日間の電流変化	70
6.3.5 積算電気量と防食率	72
6.4 まとめ	73

第7章 電気防食基準および運用方法の提案	75
7.1 はじめに	75
7.2 防食基準の根拠と特徴	75
7.3 本研究で得られた電気防食基準に関する知見	76
7.4 実構造物における防食基準運用方法の提案	78
7.4.1 橋梁における電気防食基準	78
7.4.2 栈橋における電気防食基準	80
7.5 まとめ	81
第8章 実構造物における電気防食基準の運用方法に関する妥当性確認	83
8.1 はじめに	83
8.2 方法	83
8.2.1 栈橋の概要	83
8.2.2 電気防食の概要	84
8.3 結果および考察	86
8.3.1 No.1 回路（梁下面）の結果	86
8.3.2 No.2 回路（陸側梁側面）の結果	87
8.3.3 No.4 回路（床版面）の結果	88
8.3.4 外観観察結果	90
8.4 まとめ	91
第9章 結論	93
あとがき	96
謝辞	97
研究業績	98

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と目的

我が国の社会資本の多くは 1955 年頃からの高度成長期に建設され、現在は維持管理を必要とする時期に入っている。これらコンクリート構造物の内、橋梁や栈橋など、海岸近くに建設されたものや融雪剤が散布されるものは塩害によって早期に劣化するものがある。

本来、コンクリート中の鋼材は、コンクリートに含まれるアルカリ成分によって、鋼材表面に形成される不動態皮膜で保護され、腐食しない。しかし、コンクリート中に浸透した塩化物イオン  $\text{Cl}^-$  によって不動態皮膜が破壊され、鋼材の腐食が開始する。その後は、水分、塩分および酸素の供給によって腐食が進行する。腐食によって生成したさび層は、その膨張圧によってかぶりコンクリートを破壊し、コンクリート部材にひび割れや剥離を生じさせるために、鋼材の腐食を加速する。その結果、鋼材の断面欠損が進み、構造物の耐荷力が著しく低下する。これをコンクリート構造物における「塩害」と呼んでいる。

塩害を受けたコンクリート部材の補修工法として、従来から「断面修復工法」がある。この工法は、劣化したコンクリートや高濃度の塩化物イオンを含むコンクリートを除去し、露出させた鋼材に防錆材を塗布した後に、補修モルタルなどで断面修復をするものである。また、断面修復後の塩分浸透を防止するために、部材表面にエポキシ樹脂塗料などを塗布する「表面被覆工法」を併用する場合もある。しかし、厳しい塩害環境においては、既存のコンクリート中に残存する塩化物イオンなどの腐食因子によって、補修後の 4～5 年間で再劣化する場合がある。構造物によっては、再劣化と再補修を繰り返し、最終的に解体・建設された例も少なくない。

塩害対策の一つに、「電気防食工法」がある。電気防食は、従来から港湾構造物の鋼管杭や鋼製矢板が海水によって腐食するのを防止するために、標準的に適用されている。電気防食は、鋼材腐食の原理に基づいた、理論的で根本的な防食手段であり、鋼材表面に防食電流を供給することで、鋼材の電位を卑方向（マイナス方向）に変化（これを陰分極と呼ぶ）させ、腐食を抑制するものである。コンクリート構造物に対する「電気防食工法」は、劣化したコンクリートを最小限に除去し、防錆材を塗布することなく、断面復旧した後に防食対象のコンクリート表面に陽極材を取り付け、微弱な防食電流を供給することで鋼材を防食する工法である。

電気防食工法は、構造物を供用しながら適用でき、また、長年に渡って耐久性が維持できることから、解体・建設に要する費用や環境負荷を軽減できるなどの大きな特長を持つ。このことから、電気防食工法は、我が国において 1997 年から年間 5,000～33,000 $\text{m}^2$  の実績[1.1]があり、今後も最終的な補修工法として期待されている。

電気防食工法の防食基準としては、防食電流を遮断してから 24 時間後の鋼材電位が 100mV 以上、貴方向（プラス方向）に戻れば防食効果があると判定している[1.2]。これ

を本研究では「復極量 100 mV」と呼ぶ。この基準は大気中コンクリート部材に広く適用されている。

しかし、栈橋構造の梁部材のように間欠的に海水と接する場合にはコンクリートが湿潤になり、復極に必要な酸素の供給速度が遅いため、「復極量 100 mV」の基準を適用することが不適切と考えられる[1.3], [1.4]。このような環境では、海水中の鋼材の電気防食基準として長年にわたって適用されている防食基準「鋼材電位が $-850\text{mV vs.CSE}$ （飽和硫酸銅電極基準）よりも卑」[1.5],[1.6]（以下「電位 $-850\text{mV}$ 」と呼ぶ）が適していると考えた。しかし、「電位 $-850\text{mV}$ 」の基準をコンクリート中鋼材の電気防食に適用した例[1.7],[1.8]や、防食効果を詳細に検討した研究[1.9]は極めて少ないことから、本研究ではコンクリート供試体を用いて上記二つの防食基準の適用性を検討することを目的とした。

また、実構造物を対象とする電気防食工法では、陽極材を施工する前に、ひび割れや浮きなどの劣化が顕在化したコンクリートや鋼材の浮きさびを除去した後に、モルタルなどで断面復旧する。しかし、コンクリートの劣化が顕在化していない場合は鋼材表面にさび層がある状態で陽極材を施工する。このような場合、①防食電流密度を非常に高く設定する必要がある、②防食基準を満足するまでに数年間を要する、などの問題が生じることがある[1.8]。この原因として、コンクリート中で腐食した鉄筋の表面は鉄さびの加水分解によって pH が低下し、鉄さびの還元反応が生じやすくなることが考えられた[1.10],[1.11]。しかしこれまでに、さび層を考慮した電気防食に関する研究は数例[1.8],[1.9]あるのみであり、さらにはさび層を考慮した防食基準の検討はなされていない[1.12]～[1.17]。そこで本研究では、硬化コンクリート中で鉄筋を「アノード溶解処理」によって強制的に腐食させた供試体を用いて腐食のメカニズムを明らかにし、電気防食の防食基準ならびにこれら基準の運用方法に関する提案を行うことを目的とした。

また、実構造物における 5 年間の電気防食点検結果から、本研究で提案する防食基準運用方法の妥当性の検証も本研究の目的とした。

## 1.2 論文の構成

本論文は、塩害によって腐食したコンクリート中鉄筋の腐食メカニズムの解明および電気防食基準の運用に関する提案を目的としたものであり、第1章から第9章で構成されている。

本論文の構成を図-1.1に示す。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的および論文の構成について記述した。

第2章「既往の研究」では、①コンクリート中鉄筋の電位に関する平衡論的研究、②コンクリート中鉄筋の腐食速度に関する速度論的研究、③塩害によるコンクリート中鉄筋の腐食メカニズム、ならびに、④コンクリート中鋼材の電気防食基準に関して既往の成果ならびに課題をとりまとめ、本研究の目的を明らかにした。

第3章「実験概要」では、本研究で実施した①単鉄筋供試体による防食基準の検討、②複鉄筋供試体による腐食メカニズムおよび電気防食効果の検討、③模擬干満帯供試体による流電陽極の影響の検討、ならびに、④実構造物における電気防食基準の運用方法に関する妥当性確認、の概要を述べた。

①単鉄筋供試体による実験では、一本の鉄筋を埋設後に腐食させた単鉄筋供試体を用いて、電位および腐食速度におよぼす鉄筋表面状態ならびにコンクリート特性の影響を考察すると共に、湿潤環境に適した電気防食基準の検討を行った。

②複鉄筋供試体による実験では、二本の鉄筋を埋設後に腐食させた複鉄筋供試体を用いて、マクロセルの電位および腐食速度におよぼすコンクリート性状の影響を考察し、マクロセルのモデル化による腐食メカニズムの究明を行うと共に、マクロセルに対する電気防食の効果を明らかにした。

③模擬干満帯供試体による実験では、栈橋の鋼管杭を電気防食するための流電陽極からの電流が、上部工コンクリート部材の電気防食効果に及ぼす影響を、模擬干満帯水槽に一部を浸漬した複鉄筋供試体を用いて調べた。

④実構造物における電気防食の実施例では、著しい塩害を受けたRC栈橋に電気防食を5年間実施した結果から、本研究で得られた知見や提案する運用方法の妥当性を確認した。

第4章「単鉄筋供試体による防食基準の検討」、第5章「複鉄筋供試体による腐食メカニズムおよび電気防食効果の検討」、および、第6章「模擬干満帯供試体による流電陽極の影響の検討」では、それぞれの実験方法、結果および考察を詳細に述べた。

第7章「電気防食基準および運用方法の提案」では、上記の実験結果から得られた知見から、実構造物における電気防食基準の運用方法について提案した。

第8章「実構造物における電気防食基準の運用方法に関する妥当性確認」では、第7章で提案する電気防食基準の運用方法が、実構造物において適用できることの妥当性確認を行った。

第9章「結論」では、第4章から第8章までの結論をとりまとめた。

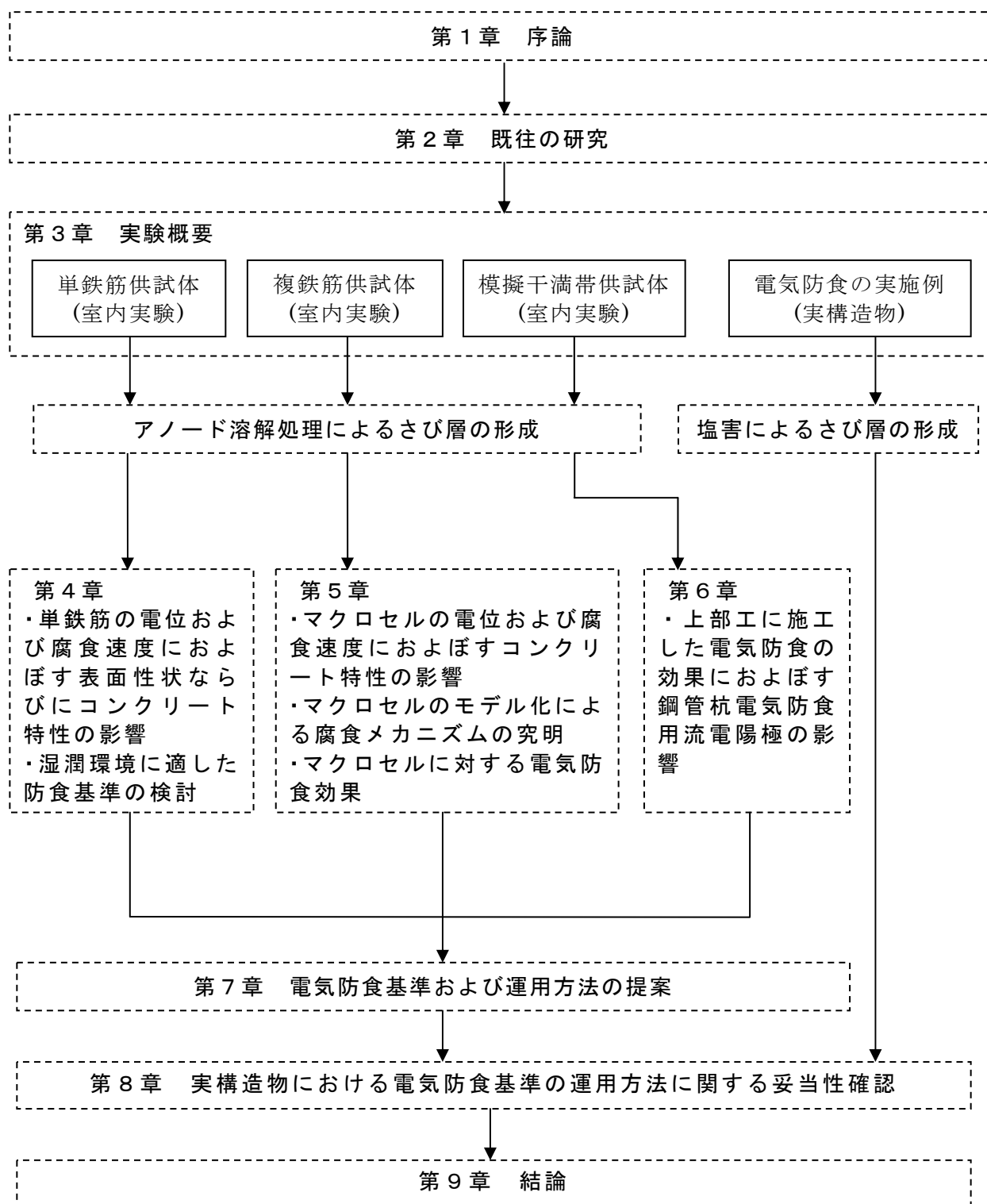


図-1.1 論文の構成



## 第1章の参考文献

- [1.1] コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会内部資料, 2009. 3
- [1.2] 栈橋劣化調査・補修マニュアル: 東京港埠頭公社, p.55, 1994.6
- [1.3] 川俣孝治, 福手勤, 阿部正美, 峰松敏和: コンクリート構造物干満帯部への電気防食法の適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.831-836, 1996
- [1.4] 木村哲士, 中野松二, 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 高橋良輔: RC 栈橋干満帯部の電気防食における復極挙動に関する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.1019-1020, 2007.9
- [1.5] JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)ー改訂版ー, 日本コンクリート工学協会 pp.29-30, 1990.3
- [1.6] 港湾の施設の技術上の基準・同解説: 日本港湾協会, p.440, 2007.7
- [1.7] 山本悟, 小林靖宏, 川岡岳晴, 田代賢吉: コンクリート構造物の電気防食法の開発および海洋環境試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.327-328, 2005.9
- [1.8] 山本悟, 川岡岳晴, 田代賢吉: 電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用, 材料, Vol.55, No.11, pp.1016-1020, 2006
- [1.9] 細田喜子, 石井浩司, 田代賢吉, 関 博: 設置環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.1155-1160, 2008.1
- [1.10] 鈴木茂: 鉄さび制御による耐食性鋼の新しい展開の可能性, 防錆管理, pp.90-96, 2009. 3
- [1.11] 西村俊弥, 田中賢逸, 清水義明: 乾湿繰返し環境における炭素鋼のさび形成に与える NaCl の影響, 鉄と鋼, Vol.81, No.11, pp.49-54, 1995
- [1.12] Funahashi M., Bushuman J.B.: Technical Review of 100 mV Polarization Shift Criterion for reinforcing Steel in Concrete, Corrosion, Vol.47, No.5, pp.376-386, May, 1991
- [1.13] Pedeferi P.: Cathodic Protection and Cathodic Prevention, Construction and Building Materials, Vol.10, No.5, pp.391-402, 1991
- [1.14] Glass G.K., Hassanein A.M., Buenfeld N.R.: CP Criteria for Reinforced Concrete in Marine Exposure Zones, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.164-171, May, 2000
- [1.15] NACE Standard Practice: Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE SP0290-2007, 2007
- [1.16] 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー107, pp.67-69, 2001.11
- [1.17] Draft International Standard ISO/DIS 12696: Cathodic Protection of Steel in

Concrete, 2005

## 第2章 既往の研究

### 2.1 はじめに

腐食反応は電子の移動を伴う電気化学反応によって進行する．腐食を生じる箇所はアノードと呼ばれ，金属鉄  $\text{Fe}$  が鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  に酸化され，金属体に電子  $\text{e}^-$  を残す．この電子  $\text{e}^-$  はカソードと呼ばれる電位がより貴な箇所へ金属体中を移動する．カソードでは環境中の酸素  $\text{O}_2$  などが電子  $\text{e}^-$  によって還元され，水酸化物イオン  $\text{OH}^-$  が生じる．この章では，まず，鉄が環境中で示しうる電位を電気化学的な平衡論により整理し，次に，腐食速度の考え方を既往の文献によって説明した．さらに，これまでの電気防食基準について調査し，本研究で検討すべき課題を明らかにした．

### 2.2 コンクリート中鉄筋の電位に関する平衡論的研究

鉄の電位-pH 図を図-2.1 に示す．この図は種々の pH 環境における鉄の平衡電位を熱力学的に計算[2.1]したもので，電位によって鉄筋の表面状態を推定できる．しかし後述するように，実際は鉄筋が腐食すると電位は平衡電位からずれるので注意が必要であるが，鉄筋が示しうる電位の範囲を知ることができるので非常に有用である．

この図-2.1 は，三沢[2.2]およびプルベイ[2.3]がネルンストの式[2.1]によって計算した結果を筆者が整理したものである．計算式を式(2.1)～(2.18)に示す．ここでは，鉄筋表面の pH は，細田らの報告[2.4]では pH4～pH10 の範囲であったことから，pH 7 を代表値とした．この pH における鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  の活量を式(2.8)から求め，得られた  $10^{-2.6}$  の値をそれぞれの式にあてはめて平衡電位を計算した．計算結果は図-2.1 の右側縦軸の標準水素電極基準 (SHE) で示し，これら

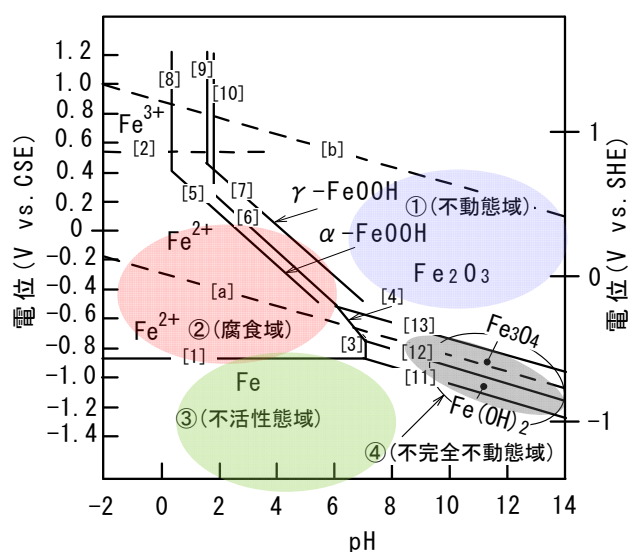
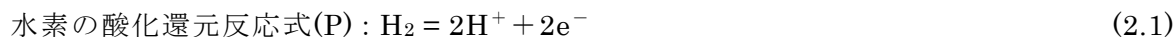


図-2.1 鉄の電位-pH 図

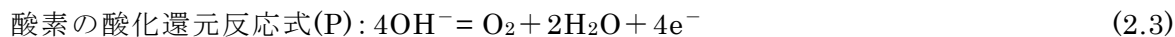
の値から 0.316V vs. SHE を減じた飽和硫酸銅電極基準 (CSE) の値を左側縦軸で示した．

式(2.1)～(2.18)は特に重要と思われるものであり，その他[2.5]の反応式は割愛した．式中で( )内の記号は，三沢[2.2]を M，プルベイ[2.3]を P とした．また， $\alpha\text{-FeOOH}$  を「橙さび」， $\gamma\text{-FeOOH}$  を「赤さび」， $\text{Fe}(\text{OH})_2$  を「緑さび」および  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  を「黒さび」と称した[2.6],[2.7]．なお，実際の塩害環境における溶液やさびは，①塩化物イオンを含むために鉄イオンが錯体を形成すること，②さびの中で  $\beta\text{-FeOOH}$  の結晶が多くなるがこの溶解度積  $K_p$  が不明で計算

できなかったこと，などに注意する必要がある．



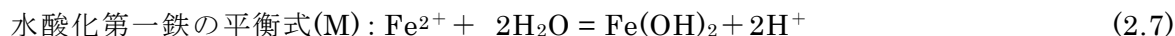
$$\text{図中の電位[a]}: E = 0.0 - 0.0591\text{pH} \quad (2.2)$$



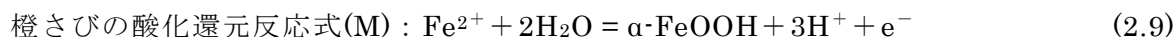
$$\text{図中の電位[b]}: E = 1.228 - 0.0591\text{pH} \quad (2.4)$$



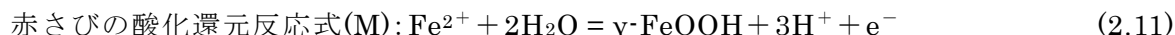
$$\text{図中の電位[1]}: E = -0.440 + 0.0296 \cdot \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (2.6)$$



$$\text{図中の鉄イオンの活量}: \log [\text{Fe}^{2+}] = 11.36 - 2\text{pH} \quad (2.8)$$



$$\text{図中の電位[5]}: E = 0.655 - 0.1775\text{pH} - 0.0592 \cdot \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (2.10)$$



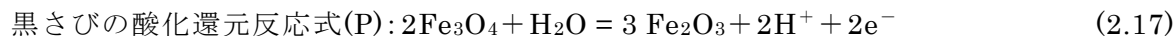
$$\text{図中の電位[7]}: E = 0.919 - 0.1775\text{pH} - 0.0592 \cdot \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (2.12)$$



$$\text{図中の電位[11]}: E = -0.104 - 0.0592\text{pH} \quad (2.14)$$



$$\text{図中の電位[12]}: E = -0.026 - 0.0592\text{pH} \quad (2.16)$$



$$\text{図中の電位[13]}: E = 0.221 - 0.0591\text{pH} \quad (2.18)$$

コンクリート中鉄筋の自然電位（外部から電流を加えない場合の電位）は図-2.1によると，健全なコンクリート中で鉄は不動態皮膜  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  によって覆われ，図中の酸素の酸化還元電位 [b]と  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$  の平衡電位[13]の間の値を示す．通気性が良い場合は[b]側の貴な電位（例えば  $-0.2\text{V vs.CSE}$ ）を示す．一方，腐食が進行した鉄筋のアノード部では，後述するように環境が酸性（例えば  $\text{pH}4$ ）になり鉄  $\text{Fe}/\text{Fe}^{2+}$  の平衡電位[1]とオキシ水酸化鉄  $\text{Fe}^{2+}/\alpha\text{-FeOOH}$  の平衡電位[5]の間の電位（例えば  $-0.35\text{V vs.CSE}$ ）を示す．とくに酸性環境ではオキシ水酸化鉄  $\text{FeOOH}$  が鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  に還元される可能性が示され，腐食や電気防食においてさび層の還元反応が生じることが考えられた[2.8]．

また，鉄の電位によって各平衡反応が酸化反応（腐食方向）または還元反応（防食方向）のどちらの向きになるかをプルベイが整理して表にまとめたもの[2.9]を表-2.1に示す．この表からも，電位が  $-0.2\text{V vs.CSE}$  よりも卑であると，さび  $\text{FeOOH}$  が鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  に還元されることが示唆され，さび層が酸素  $\text{O}_2$  と同様に強い酸化作用を示すと考えられた．

表-2.1 鉄の電位と酸化還元反応の向きの目安[2.9]

電位 E の大凡の範囲 (V vs. CSE)	Fe / Fe <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	Fe <sup>2+</sup> /FeOOH など	2H <sub>2</sub> O / O <sub>2</sub>
E < -0.85	還元	還元	還元	還元
-0.85 < E < -0.55	酸化	還元	還元	還元
-0.55 < E < -0.20	酸化	酸化	還元	還元
-0.20 < E < +0.70	酸化	酸化	酸化	還元
+0.70 < E	酸化	酸化	酸化	酸化

## 2.3 コンクリート中鉄筋の腐食速度に関する速度論的研究

鋼材が均一な環境中にあっても表面の不均一さに起因して、微少なアノードとカソードを生じる。鋼材が中性溶液中にあり、それぞれが電氣的に独立したとすると、アノードでは鉄  $\text{Fe}$  と鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  の平衡電位  $E_0^a$  を示し、カソードでは酸素  $\text{O}_2$  の平衡電位  $E_0^c$  を示す。しかし、実際は両者が電氣的に接続されているので、アノードから腐食電流が流出し溶液を流れてカソードへ流入する「マイクロセル」を形成する。この概念を図-2.2 に示す。

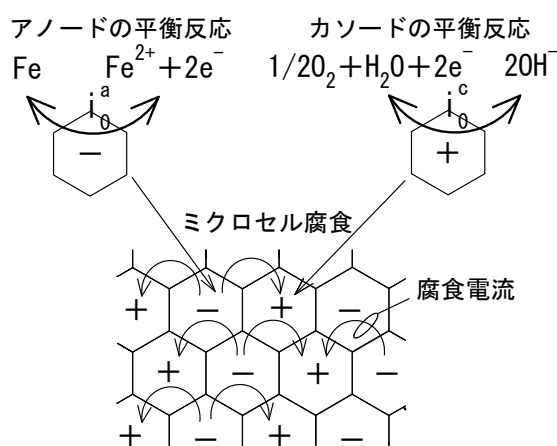


図-2.2 平衡反応とマイクロセルの概念図

マイクロセルは、後述する「マクロセル」と異なりアノードとカソードが絶えず置き代わって全面が均一に腐食する特徴がある。アノードの電位は腐食電流が流れる前の平衡電位  $E_0^a$  から貴方向に分極し、カソードの電位に近づく。一方、カソードの電位は平衡電位  $E_0^c$  から卑方向に分極し、アノードの電位に近づく。両分極が活性化分極であるとする、分極の仕方は式(2.19)に示すターフェル式[2.10],[2.11]で表され、電位は電流密度の対数に比例する。両分極線は自然電位  $E_{\text{cor}}$  で一致し、その電位における電流が腐食電流  $I_{\text{cor}} (=I_a = I_c)$  となる。とくに、

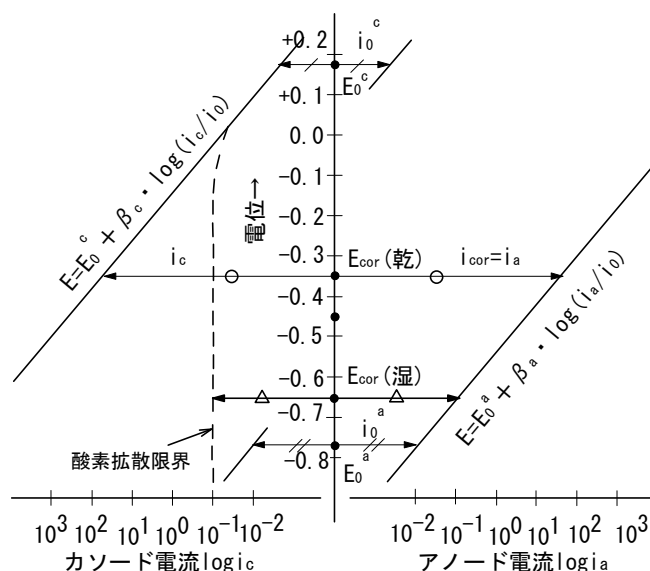


図-2.3 ターフェル式と腐食速度図

アノードとカソードの面積が等しいとすると、単位面積当たりの電流  $I$  を電流密度  $i$  で表すことができる。この概念を図-2.3 に示す。 $E_0$  はアノードまたはカソードの平衡電位 ( $E_0^a$ ,  $E_0^c$ )、 $i_0$  は平衡電位  $E_0$  における交換電流密度 ( $i_0^a$ ,  $i_0^c$ ) である。

ターフェル式の  $\beta$  は「ターフェル勾配」と呼ばれアノード反応の  $\beta_a$  は正、カソード反応の  $\beta_c$  は負の値をとる。ターフェル勾配  $\beta$  は式(2.20)で表され、 $\alpha$  は電極反応の透過係数で一般に 0.5、 $n$  は反応に関与する価数、 $F$  はファラデー定数で  $9.6485 \times 10^4$  クーロン/mol、 $R$  は気体定数で  $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ 、 $T$  は絶対温度で  $273.15 + ^\circ\text{C}$  である。例えば  $25^\circ\text{C}$  における酸素  $\text{O}_2$  のターフェル勾配  $\beta_c$  は  $-59\text{mV}$  になる。

$$E = E_0 + \beta \times \log(i / i_0) \quad (2.19)$$

ここで、 $\beta = 2.303 \times RT / (\alpha nF)$  (2.20)

$R$  : 8.314 J/mol・K

$T$  : 絶対温度

$\alpha$  : 透過係数

$n$  : 価数

$F$  :  $9.6485 \times 10^4$  クーロン/mol

乾燥環境にある硬化コンクリート中では、大気中の酸素ガスは連続した細孔を通して鋼材表面近くまで到達する。そのため陰分極は酸素の供給速度に依存せずに活性化分極するので、ターフェル式に従った分極をする[2.12]。

しかし、湿潤環境ではコンクリートの細孔に多くの水溶液が存在するため、大気中の酸素ガスは一旦、細孔溶液中に溶解し、細孔溶液中での拡散によって鋼材表面へ供給されることになる。この還元反応速度は図-2.3の破線で示すように酸素拡散限界値となり、乾燥環境よりも腐食速度  $i_{cor}$  は低くなるとされている[2.12]。

電気防食では鉄筋の電位が卑（マイナス方向に低い）方向に 100mV 以上分極するようにカソード電流を流すが、コンクリートが湿潤であれば図-2.3の△印に示すように、分極のための電流密度は非常に低いことが予想される。しかし、筆者らの研究[2.13]によると、図-2.4に示すように、塩害を受けた栈橋の梁のコンクリートが湿潤であるにもかかわらず、通電初期において高い防食電流密度が必要な場合がある。この図では、湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の防食電流密度は大気中の 10 倍ほど必要であった。この原因として、劣化が顕在しないコンクリート中の鉄筋表面にさび層が存在したためと推定されたが、原因の詳細は不明である。このように、「鉄筋がさび層を有する場合は防食電流密度が非常に高くなる」ことの理由は、既往の研究からでは説明できない。そこで、本研究は、その原因を供試体実験で究明し、すでにさび層を有する鉄筋に関して適正な電気防食設計のための資料を得ることを目的とした。

なお、本論文での「湿潤環境」とは、コンクリート標準示方書[設計編]の表 8.14.1 にあるように「コンクリートが連続して、あるいはしばしば水で飽和されている場合」[2.14]を指し、栈橋の梁下面のように、間欠的に海水と接する部位や、滞留水がある床版面も含む。

また、「さび層を有する」とは、コンクリート標準仕様書[維持管理編]の表 10.3.3 腐食グレードⅣ” 断面欠損が生じている“状態[2.15]を指す。

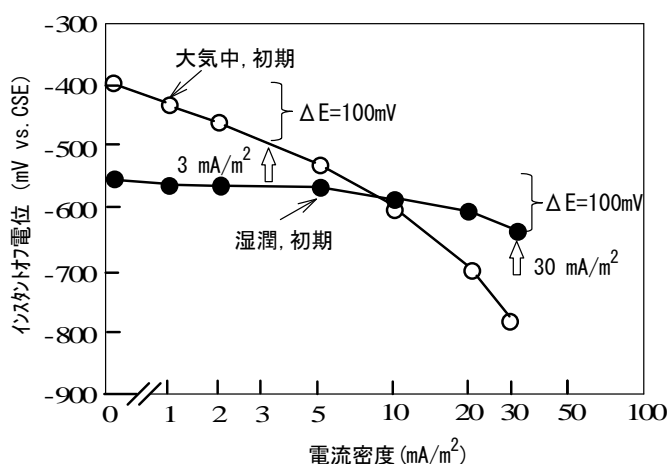


図-2.4 栈橋の梁における陰分極曲線[2.13]

## 2.4 塩害によるコンクリート中鉄筋の腐食メカニズム

塩害における鉄筋の腐食は、ブリーディング部のようなコンクリートが粗な箇所や、かぶりが薄い箇所に集中する特徴がある。そのため、2.3 節で述べたような「マイクロセル」はアノード部に集中して生じ、さらにこれよりも電位が貴（プラス方向に高い）な箇所がカソード部となる「マクロセル」を形成して腐食が進行する。本論文ではこれを「鉄筋内マクロセル」と呼ぶ。また、コンクリートの湿潤差などによって部材内の近接する鉄筋間で形成されるマクロセルを「鉄筋間マクロセル」と呼ぶ。鉄筋内マクロセルの概念を図-2.5 に示す。アノード部では金属鉄Feが電子 $e^-$ を失い、鉄イオン $Fe^{2+}$ となって溶出する。鉄イオン $Fe^{2+}$ は水 $H_2O$ と加水分解して水酸化鉄 $Fe(OH)^+$ を生成し、水分子 $H_2O$ から $OH^-$ を奪う結果、アノード部の水素イオン濃度が高くなりpHが低下する[2.16]。腐食電流 $I_{cor}$ はアノード部から流出し、コンクリートを通してカソード部（健全部）へ流入する。コンクリート中に塩化物イオン $Cl^-$ が含まれている場合、マイナス電荷である $Cl^-$ がアノード部へ移動する。その結果、低pHで高濃度の塩化物イオン環境を維持しながら局所的な腐食が進行する。塩害を受けた栈橋上部工のRC部材において補修時に採取された梁側面のスターラップ筋表面におけるpH測定例[2.17]を図-2.6 に示す。pHは比較的に健全な箇所ではpH11 程度であったのに対し、断面欠損が50%程度まで進行した箇所ではpH3 程度の酸性を示した。

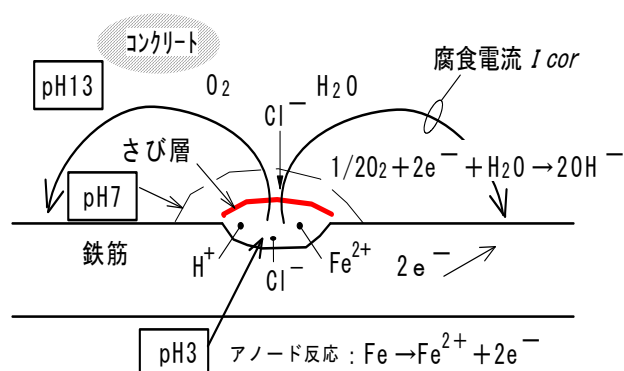


図-2.5 コンクリート中鉄筋腐食の概念



図-2.6 腐食した鉄筋表面 pH 測定例

このように高アルカリ性のコンクリート中においても腐食箇所では酸性環境になることから、さび層を有する鉄筋の腐食メカニズムはさび層を有さないものと大きく異なると考えられた。しかし、既往の研究では、硬化コンクリート中でさび層を有する鉄筋の腐食メカニズムを解明したものがない。そこで、本研究は、硬化コンクリート中でさび層を有する鉄筋の腐食メカニズムを解明し、これらに対する電気防食の効果を検証することを目的として実施した。



## 2.5 コンクリート中鋼材の電気防食基準

### 2.5.1 電気防食の原理

電気防食では、図-2.7 に示すように外部から防食電流  $I_c'$  を人為的に与えるので鋼材の電位は自然電位から図中の太線のように陰分極し、アノード電流は  $I_a'$  まで減少する。およそ 100mV ほど陰分極すると、アノード電流  $I_a'$  は無視できるほど小さくなるので鋼材を防食できるとされている[2.18]。この原理から、防食基準「分極量 100mV」が、電気防食の主に、通電開始時に採用されている。

また、第1章で述べたように、防食基準「復極量 100 mV」は大気中コンクリート部材に広く適用されている。電気防食において、鋼材の電位は防食電流遮断後に、貴方向へ徐々に復極する。この復極量を測定することによって防食時の電位が復極量と同程度に分極していたと判断する。具体的には電流遮断直後のインスタントオフ電位  $E_{ins}$ （電圧降下による誤差を含まない電位）と電流遮断 24 時間後のオフ電位  $E_{off}$  との差を復極量  $\Delta E$  として、この値が 100mV 以上であれば防食状態にあると判定している。

一方、湿潤環境では復極に必要な酸素の供給速度が遅いために復極量  $\Delta E$  での判定は困難になる。このような場合は、図-2.1 で示したように「③不活性態域」まで分極させれば腐食が停止するので「電位 -850 mV」が防食基準として適用できると考えられている[2.19]。

これらの防食基準の内、実構造物の電気防食では、「復極量 100mV」が最も広く適用されている。この基準は、相対的な電位変化量で管理するので、通電によって鉄筋近傍の環境が改善された場合は、所要の電流密度を下げるができる特長がある。一方、防食基準「分極量 100mV」では、通電前の自然電位  $E_{cor}$  を基準にすることから、オフ電位が自然電位  $E_{cor}$  よりも  $\alpha$  mV ほど貴になった場合でも  $100 + \alpha$  mV ほど分極するように余分な電流を流す欠点がある。しかし、湿潤環境のように復極量が不十分な場合でも「分極量 100mV」を基準にすることで防食状態を確認できる特長がある[2.20]。

### 2.5.2 電気防食効果の確認方法

現在、適用されている電気防食基準として、上述したように A.分極量 100mV、B.復極量 100mV および C.電位 -850mV の3種類がある。これらの基準による防食効果の確認方法の概念を時間と電位の関係で表して図-2.8 に示す。

コンクリート中鉄筋の電位は、コンクリート中に埋設した照合電極を基準に電位差計（デ

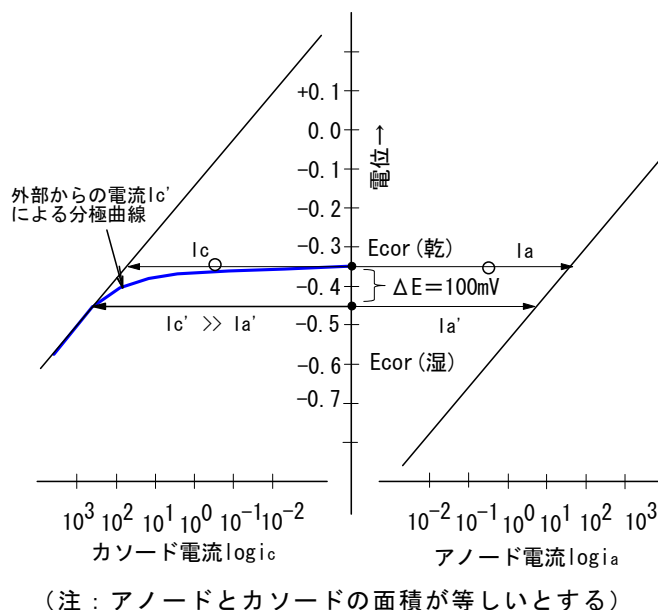


図-2.7 コンクリート中鋼材の分極曲線

デジタルマルチメータ)で測定することが一般的である。通電時の電位は、電流  $I$  と照合電極と鉄筋の間に存在するコンクリート抵抗  $R$  によって生じる電圧降下  $IR$  が含まれるので、電流を遮断した直後の「インスタントオフ電位」を測定する。インスタントオフ電位は電流  $I$  を 0(ゼロ)にするので電圧降下  $IR$  を含まない電位である。

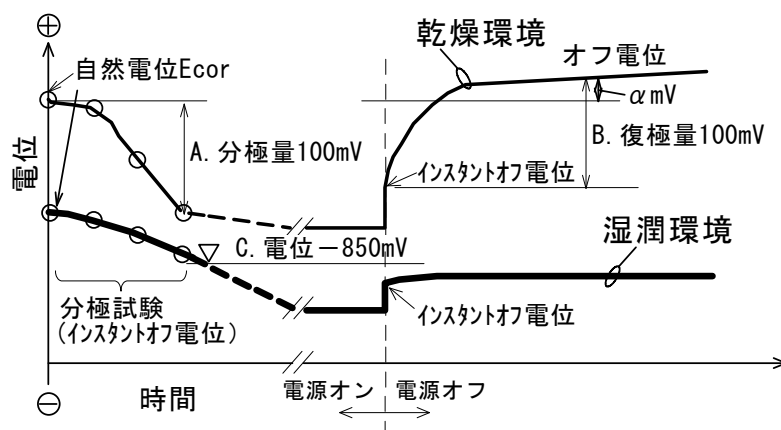


図-2.8 各電気防食基準の概念図

以下に、それぞれの防食基準の特徴を述べる。

#### A. 分極量 100mV

分極量は、主に電気防食施工後に、適正な電流密度を決定するために測定する。この試験は、分極試験または  $E-\log I$  試験と呼ばれ、防食電流密度を一定時間、例えば 15 分間ごとに 1, 2, 5, 10,  $\dots$  mA/m<sup>2</sup> のように段階的に上げ、インスタントオフ電位  $E_{ins}$  が自然電位  $E_{cor}$  よりも 100mV 以上卑になる電流密度を「防食電流密度」として設定する。

#### B. 復極量 100mV

復極量は、電気防食の点検時に防食効果を確認するために測定する。この試験は、インスタントオフ電位  $E_{ins}$  を測定した後に、例えば 24 時間後のオフ電位  $E_{off}$  を測定し、 $E_{off}$  から  $E_{ins}$  を減じた値が 100mV 以上あれば、防食効果があると判定するものである。分極量が不足な場合は電流密度を 20～30%ほど高め、分極量が 300mV を超える場合は電流密度を 20～30%ほど下げるなどして適正な電流密度に維持する。

#### C. 電位 -850mV

電位 -850mV は、インスタントオフ電位を測定し、測定値が飽和硫酸銅電極（CSE）基準で -850mV よりも卑であれば、防食効果があると判定するものである。

### 2.5.3 現在の電気防食基準

コンクリート中鋼材の電気防食基準としては、(1)NACE SP0290-2007[2.21]、(2)土木学会コンクリートライブラリー107[2.22]、(3)JCI 海洋コンクリート構造物の電気防食指針(案)-1991、および、(4)ヨーロッパ規格 EN12696-2005[2.23]、などが提案されている。それぞれの電気防食基準の概要を以下に述べる。

#### (1)NACE SP0290-2007

a)100mV 以上の分極量または復極量

インスタントオフ電位とオフ電位の差から復極量を求める．

復極量の測定時間は，コンクリートが緻密，被覆があるまたは，飽水状態にある場合は長くする必要がある．

b)分極試験 (E-logI test)

分極試験によって初期の防食電流密度を決定する．

(2) 土木学会コンクリートライブラリー107

a)100mV 以上の電位変化量

自然電位からの分極量またはインスタントオフ電位とオフ電位の差からもとめた復極量が 100mV 以上であること．

コンクリートが湿潤な場合は，復極量が少なくなるので分極量で評価しても良い．

(3) JCI 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)－改訂版－1990

a)海水中の電位が－850mV vs.CSE より卑

ひび割れ部などで鋼材が直接に海水に接する場合でも電気防食できるようにする．

(4) EN 12696-2005

下記のいずれかの基準を満足すること

a)インスタントオフ電位－720mV vs.Ag/AgCl/0.5M KCl より卑 (－770mV vs.CSE)

この基準は実績から決めたものである．

b)最大 24 時間後における復極量が 100mV 以上

この基準は実績から決めたものである．

オフの期間に電位は温度や含水量によって変化する．

c)24 時間を超える復極量が 150mV 以上 (一般的には 7 日間)

この基準は実績から決めたものである．

オフの期間に電位は温度や含水量によって変化する．

以上のように，現在の電気防食基準にはさび層を考慮したものがないために，電気防食工事の完了後に「基準を満足しない理由から施主への引渡しが遅延される」などの問題が生じる可能性がある．そこで本研究は，さび層を有する供試体を用いて，鉄筋の腐食防食の原理，ならびに，電気防食の原理に基づいた防食基準の運用方法を提案することを目的として実施した．

## 2.6 まとめ

塩害によって腐食したコンクリート中鉄筋の腐食メカニズムおよび電気防食基準に関して既往の研究を調べた結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 電位－pH 図から、酸性環境ではオキシ水酸化鉄  $\text{FeOOH}$  が鉄イオン  $\text{Fe}^{2+}$  に還元される可能性が示唆され、腐食や電気防食においてさび層の還元反応が生じることが考えられた。
- (2) 「鉄筋がさび層を有する場合は防食電流密度が非常に高くなる」ことの理由は、既往の研究からでは説明できない。
- (3) 既往の研究では、硬化コンクリート中でさび層を有する鉄筋の腐食メカニズムを解明したものがない。
- (4) 現在は、さび層を考慮した電気防食基準がない。

## 第2章の参考文献

- [2.1] 例えば, 渡辺正, 金村聖志, 益田秀樹, 渡辺正義: 基礎化学コース 電気化学, 丸善, 2008
- [2.2] Misawa T.: The Thermodynamic Consideration for Fe-H<sub>2</sub>O System at 25°C, Corrosion Science, Vol.13, pp.659-676, 1973
- [2.3] Pourbaix M.: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, National Association of Corrosion Engineers, p.307-321, 1974
- [2.4] 細田喜子, 石井浩司, 田代賢吉, 関 博: 設置環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.1155-1160, 2008
- [2.5] Yamamoto S., Tashiro K., Hosoda Y., Ishii K., Seki H.: Experimental Consideration of Criteria for Cathodic Protection of RC Members under High Moisture Conditions, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Volume One of Three, p.413-427, 2010
- [2.6] 三沢俊平: 鉄さびの生成機構, 防錆管理, pp.408-416, 1994. 11
- [2.7] 鈴木茂: 鉄さび制御による耐食性鋼の新しい展開の可能性, 防錆管理, pp.90-96, 2009.3
- [2.8] 西村俊弥, 田中賢逸, 清水義明: 乾湿繰返し環境における炭素鋼のさび形成に与える NaCl の影響, 鉄と鋼, Vol.81, No.11, pp.49-54, 1995
- [2.9] Pourbaix M.: Theoretical and Experimental Considerations in Corrosion Testing, Corrosion Science, Vol.12, pp.161-190, 1972
- [2.10] 伊藤伍郎: 腐食科学と防食技術, pp.74-77, コロナ社, 1971
- [2.11] ユーリック H.H., レヴィー R.W.: 腐食反応とその制御 (第3版), 産業図書, p.43-59, 2002
- [2.12] Funahashi M., Bushuman J.B.: Technical Review of 100 mV Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete, Corrosion, Vol.47, No.5, pp.376-386, May, 1991
- [2.13] 山本悟, 川岡岳晴, 田代賢吉: 電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用, 材料, Vol.55, No.11, pp.1016-1020, 2006
- [2.14] 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], p.123, 2007
- [2.15] 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], p.109, 2007
- [2.16] Pourbaix, M.: Significance of Protection Potential in Pitting and Intergranular Corrosion, Corrosion, Vol.26, No.10, pp.431-438, October, 1970
- [2.17] 山本悟, 田代賢吉, 立林喜子, 石井浩司, 関博: 湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関する検討, コンクリート工学論文集, pp.1-11, 2011.9
- [2.18] Glass G.K., Hassanein A.M., Buenfeld N.R.: CP Criteria for Reinforced Concrete in Marine Exposure Zones, Journal of Materials in Civil Engineering,

- pp.164-171, May, 2000
- [2.19] JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)－改訂版－, 日本コンクリート工学協会 pp.29-30, 1990.3
- [2.20] 山本悟, 井川一弘, 松島洋, 坂本浩行, 片脇清士: 実橋のコンクリート桁における電気防食試験, 防錆管理, pp.14-19, 1990
- [2.21] NACE Standard Practice : Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE SP0290-2007, 2007
- [2.22] 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー107, pp.67-69, 2001.11
- [2.23] Draft International Standard ISO/DIS 12696 : Cathodic Protection of Steel in Concrete, 2005

## 第3章 実験概要

本研究では、①単鉄筋供試体による実験（2006年1月～2007年1月）、②複鉄筋供試体による実験（2009年5月～2010年11月）、③模擬干満帯供試体による実験（2009年5月～2010年11月）を実施し、さらに④実構造物における電気防食点検結果（2006年7月～2011年7月）から本研究で提案する防食基準運用方法の妥当性を検証した。

これらの研究では、塩害によってコンクリート中の鉄筋が腐食した状態で電気防食を適用することを想定して、硬化コンクリート中でアノード溶解処理によって鉄筋を腐食させた供試体を用いた。腐食の程度は、2.3節で述べたように“腐食のグレードⅣ”程度を目標にした。また、海水と接する部位では、コンクリートが湿潤になるので2.3節で述べたような“湿潤状態”の暴露条件で実験を行った。これらの実験概要を表-3.1にまとめて示す。

第4章の「単鉄筋供試体による防食基準の検討」では、一本の鉄筋を埋設後に腐食させた単鉄筋供試体を用いて、電位および腐食速度におよぼす鉄筋表面状態ならびにコンクリート性状の影響を考察すると共に、湿潤環境に適した電気防食基準の検討を行った。

第5章の「複鉄筋供試体による腐食メカニズムおよび電気防食効果の検討」では、上下2本の鉄筋を埋設後に腐食させた複鉄筋供試体を用い、下筋のみを食塩水に浸漬して形成した湿潤差によるマクロセルの電位および腐食速度におよぼすコンクリート特性の影響を検討し、マクロセルのモデル化による腐食メカニズムの究明を行うと共に、マクロセルに対する電気防食の効果を検討した。

第6章の「模擬干満帯供試体による流電陽極の影響の検討」では、模擬干満帯水槽に下筋のみを浸漬した複鉄筋供試体を用いて、栈橋の鋼管杭を電気防食するための流電陽極からの電流が、上部工コンクリート部材の電気防食効果に及ぼす影響を調べた。

第8章の「実構造物における電気防食基準の運用方法に関する妥当性確認」では、実構造物における5年間の電気防食点検結果から、第7章で提案する防食基準運用方法の妥当性を検証した。

表-3.1 実験概要一覧

実験の 名称	目的	供試体または対象	暴露条件*	測定項目
単鉄筋 供試体	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋の電位, 腐食速度におよぼす鉄筋表面状態, コンクリート性状の影響を把握</li> <li>湿潤環境に適した電気防食基準を検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>寸法: 100×100×230mm</li> <li>鉄筋: <math>\phi 16\text{mm}</math>みがき丸鋼1本, コンクリート硬化後にさび層を設けた</li> <li>コンクリート: かぶり20 または42mm, W/C=53%, Cl=10kg/m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸漬液: 飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> および飽和食塩の混合水溶液</li> <li>乾湿5日/浸漬2日</li> <li>期間*: 1年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然電位</li> <li>インスタントオフ電位</li> <li>復極量</li> <li>鉄筋の表面観察</li> <li>鉄筋表面のpH</li> <li>鉄筋の質量</li> <li>塩化物イオン量</li> </ul>
複鉄筋 供試体	<ul style="list-style-type: none"> <li>マクロセルの電位および腐食速度におよぼすコンクリート特性の影響を把握</li> <li>モデル化による腐食メカニズムの究明</li> <li>マクロセルに対する電気防食の効果を検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>寸法: 300×230×100mm</li> <li>鉄筋: <math>\phi 16\text{mm}</math>みがき丸鋼を上下2本, かぶり20 mm, コンクリート硬化後にさび層</li> <li>コンクリート: かぶり20mm, W/C=53%, Cl=10kg/m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸漬液: 3%食塩水</li> <li>下筋のみを浸漬</li> <li>期間*: 1.5年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然電位</li> <li>インスタントオフ電位</li> <li>復極量</li> <li>マクロセル電流</li> <li>防食電流</li> <li>鉄筋間の電気抵抗</li> <li>鉄筋の表面観察</li> <li>鉄筋表面のpH</li> <li>鉄筋の質量</li> <li>塩化物イオン量</li> <li>コンクリートの抵抗率</li> <li>含水率</li> </ul>
模擬干満 帯供試体	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼管杭の電気防食用流電陽極からの電流が, 上部工コンクリート部材の電気防食効果におよぼす影響を調べる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>同上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸漬液: 3%食塩水</li> <li>下筋のみを36分間×2回/日または93分×2回/日浸漬</li> <li>期間*: 1.5年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然電位</li> <li>インスタントオフ電位</li> <li>復極量</li> <li>マクロセル電流</li> <li>防食電流, 流電陽極電流</li> <li>鉄筋間の電気抵抗</li> <li>鉄筋の質量</li> </ul>
実構造物 における 電気防食 の実施例	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案する電気防食基準運用方法の検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷役RC栈橋第5スパン</li> <li>履歴: 竣工1968年</li> <li>激しい塩害を受けたため23～25年目に断面補修および表面被覆</li> <li>38年目に断面補修による再補修および電気防食</li> <li>対象面積: 合計1,438 m<sup>2</sup></li> <li>No.1梁下面226m<sup>2</sup></li> <li>No.2陸側梁測面339m<sup>2</sup></li> <li>No.3海側梁測面480m<sup>2</sup></li> <li>No.4床版下面333m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋環境</li> <li>岩塩の荷揚げ, 積み出しによる塩害</li> <li>期間*: 5年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然電位</li> <li>インスタントオフ電位</li> <li>復極量</li> <li>防食電流</li> <li>外観観察</li> <li>電気防食基準の運用性</li> <li>A.分極量100mV</li> <li>B.復極量100mV</li> <li>C.電位-850mV</li> </ul>

\*暴露期間は, 電気防食の通電を開始したときを起点とした期間を表す.



## 第4章 単鉄筋供試体による防食基準の検討

### 4.1 実験目的

塩害によって腐食したコンクリート中铁筋の腐食に関するこれまでの研究は、予め腐食させた鉄筋をコンクリート供試体に打設して行っている[4.1],[4.2],[4.3]。鉄筋が腐食すると、さびの加水分解によって環境が酸性になるが、これをコンクリート中に埋設するとセメントのアルカリ成分によって、鋼材表面がアルカリ性になり、実構造物中での腐食環境と異なる。そこで、本実験では、鉄筋を硬化コンクリート中でアノード溶解処理して強制的に腐食させ、実環境に近い状態で、鉄筋の電位および腐食速度におよぼす表面性状ならびにコンクリート性状の影響を調べることを目的とした。

また、栈橋上部工の梁部材のように間欠的に海水中に接する場合にはコンクリートが湿潤となり、復極に必要な酸素の供給速度が遅いため、この基準を満足しない場合がある[4.4],[4.5]。このような環境では、海水中の鋼材の電気防食基準として長年間にわたって適用されている防食基準「電位 $-850\text{mV}$ 」[4.6]が適していると考えた。しかし、この基準をコンクリート硬化後に腐食した鉄筋に対して適用した例や、防食効果を詳細に検討した研究は極めて少ない[4.7]。本研究は、実環境で腐食した鉄筋を模擬するために、硬化コンクリート中の鉄筋を腐食させた供試体を用いて、防食基準「B.復極量  $100\text{mV}$ 」および「C.電位 $-850\text{mV}$ 」の適用性を検討することを目的として実施した。

なお、本論文での「湿潤環境」とは、コンクリート標準示方書[設計編]の表 8.14.1 にあるように「コンクリートが連続して、あるいはしばしば水で飽和されている場合」を指す。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 供試体

##### (1) 形状・寸法

供試体の形状・寸法を図-4.1に示す。供試体の寸法は  $100\times 100\times 230\text{mm}$  とし、酸素や塩化物イオンの供給を受けやすいようにかぶりを  $20\text{mm}$ 、または  $42\text{mm}$  の位置に1本の鉄筋を埋設した。ブリーディングの影響を避けるために、図-4.1の矢印で示すように型枠を立てて上方から打設した。

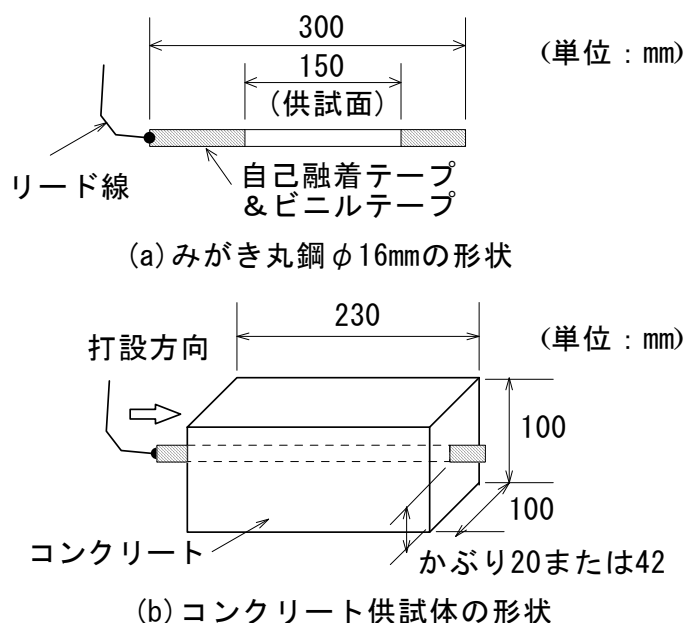


図-4.1 コンクリート供試体および鉄筋の形状

## (2) 使用材料

供試体に使用したコンクリートの示方配合を表-4.1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 W/C は 53% とした。また、練混

表-4.1 コンクリート示方配合

スランブ° (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP/C	AE/C
				W	C	S	G		
12	53	4.5	48	168	321	860	959	$5.5 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-5}$

<凡例> C : 普通ポルトランドセメント

SP : AE 減水剤, AE : AE 助剤

S : 表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.41%

G : 表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.57%

ぜ水に塩化ナトリウムを溶解し、コンクリート体積あたりの塩化物イオン Cl<sup>-</sup> が 10kg/m<sup>3</sup> となるようにしたもの、塩化物イオンを添加しない供試体を用意した。鉄筋は直径が 16mm のみがき丸鋼を使用した。鉄筋は端部にリード線を接続した後に柔軟性樹脂塗料を用いて防水処理を施し、供試面積が  $7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  (供試長さ 150mm) となるように両端を自己融着テープおよびビニルテープで被覆した。電気防食用の陽極材は幅 20mm×厚さ 1.3mm の貴金属酸化物被覆チタン陽極を用いた。また、鉄筋の電位を測定するために鉛照合電極を用いた。

### 4.2.2 アノード溶解処理

硬化コンクリート中の鉄筋を腐食させるために、供試体を水道水中に浸漬してアノード溶解処理した。なお、鋼材をアノードにして腐食させることを「電食」とも呼ぶが ISO[4.8]で「電気鉄道の迷走電流によるパイプラインなどの腐食を電食」と定義されているので、本報では混同を避けるためにアノード溶解処理と呼ぶ。アノード溶解処理はコンクリートにひび割れが生じない程度[4.9]とし、鉄筋の表面積に対して 1.1A/m<sup>2</sup> の電流密度で約 8 日間通電 (200Ah/m<sup>2</sup>) した。理論的な腐食量をファラデーの法則から計算すると、通電電気量 200Ah/m<sup>2</sup> に鉄の電気化学当量 1.042g/Ah を乗じた 208.4g/m<sup>2</sup> である。

### 4.2.3 暴露条件

供試体の暴露方法を図-4.2に示す。リード線を取り付けた陽極材を樹脂製容器内に置き、その上に湿布を広げ、さらにアノード溶解処理した供試体を置いた。暴露条件は乾湿繰返しおよび常時浸漬の2条件とした。浸漬液は、長期塩害環境に曝されたコンクリート細孔中の水溶液が主に飽和塩化ナトリウムならびに飽和水酸化カルシウム Ca(OH)<sub>2</sub> で構成されると考え、それらの濃度変化を少なくするために、同様な溶液として両塩の混合飽和水溶液を使用した。乾燥時は湿布が乾燥しない程度に浸漬液を容器から取り出した。乾湿繰返しは、2 日間浸漬および 5 日間乾燥を 1 サイクルとした。

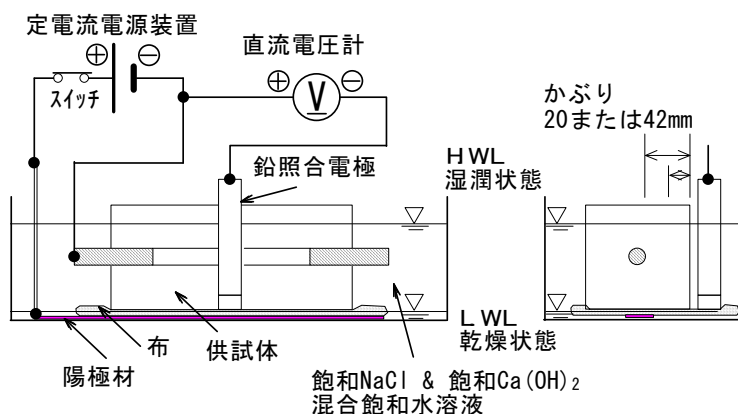


図-4.2 供試体の暴露方法

#### 4.2.4 通電方法

通電方法は図-4.2 に示すように、定電流電源装置を用いて供試体の下に設置した陽極材から鉄筋へ防食電流を流した。電流は、①乾湿条件で「B.復極量 100 mV」、②乾湿条件で「C.電位 -850 mV」、および、③浸漬条件で「C.電位 -850 mV」になるように適宜調整した。鉄筋の電位測定は、鉛照合電極を基準にして直流電圧計を用いて行った。電位は測定値  $E_m$  から 800mV を減じて飽和硫酸銅電極基準の値  $E_{CSE}$  に換算した (mV vs.CSE)。なお、電流密度は全て、鉄筋の表面積に対する値とした。

#### 4.2.5 実験期間

実験の工程を表-4.2 に示す。鉄筋のアノード溶解処理後 23 日経過後に通電を開始した。暴露期間は 0.5 年および 1 年間とした。なお、乾湿条件では復極が進まず防食基準「復極量 100 mV」の実験ができなかったため、暴露開始 31 日後から 60 日間、通電を停止した状態で供試体を乾燥させた。また、鉄筋のインスタントオフ電位が -1,000mV vs.CSE より卑になる場合は、電位が過度に卑になることを避けるために供試体を適宜乾燥させた。

表-4.2 実験の工程表

年度	1年目			2年目											
月	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
供試体打設	●														
脱型, 処理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
アノード溶解 処理		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
通電準備		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
電気防食	31日間	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
不通電期間	60日間	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

## 4.2.6 供試体の種類

供試体の種類を表-4.3に示す。なお、本文中や図中での供試体の呼称は、供試体番号，塩化物イオン濃度，かぶりの順とした。（供試体の呼称例：No.5 Cl:0-20mm）

表-4.3 供試体の種類一覧

供試体 番号*	塩化物 添加量 (kg/m³)	かぶり (mm)	暴露 条件	暴露 期間** (年)	防食基準
No.1	0	20	乾湿	0.5	復極量 100mV
No.2				1	
No.3				0.5	電位－850mV
No.4				1	
No.5				1	無防食
No.6				0.5	
No.7			1	電位－850mV	
No.8			1	無防食	
No.9～ No.11	浸漬		8 日	アノード溶解 処理量確認	
No.14	10		乾湿	1	復極量 100mV
No.15				0.5	
No.16				0.5	電位－850mV
No.17				1	
No.18				1	無防食
No.19				0.5	
No.20			浸漬	1	電位－850mV
No.21				1	無防食
No.22			浸漬	8 日	アノード溶解 処理量確認
No.23				8 日	
No.24		42	乾湿	0.5	復極量 100mV
No.25				1	
No.26				0.5	電位－850mV
No.27				1	
No.28				0.5	無防食
No.29				1	
No.30			浸漬	1	電位－850mV
No.31	1			無防食	
No.32	42		乾湿	0.5	復極量 100mV
No.33				1	
No.34		0.5		電位－850mV	
No.35		1			
No.36		0.5		無防食	
No.37		1			
No.38		浸漬	1	電位－850mV	
No.39			1	無防食	
No.40		42	乾湿	0.5	復極量 100mV
No.41				1	
No.42	0.5			電位－850mV	
No.43	1				
No.44	0.5			無防食	
No.45	1				
No.46	浸漬		1	電位－850mV	
No.47			1	無防食	
No.48	浸漬		8 日	アノード溶解 処理量確認	
No.49			8 日		
No.50		8 日			

\*欠番は予備供試体

\*\*暴露期間は電気防食のための通電を開始したときを起点とした年数を，アノード溶解処理は，処理日数を表している。

#### 4.2.7 測定項目

測定は、鉄筋の自然電位、インスタントオフ電位および 24 時間後のオフ電位とした。電気防食供試体の電位は全てインスタントオフ電位  $E_{ins}$  とした。電位測定は鉛照合電極を容器内の湿布に当てて行った。復極量  $\Delta E$  は、1 ヶ月ごとに測定した。

暴露 0.5 年後および 1 年後に供試体を割裂し、鉄筋を取り出して表面観察および、蒸留水を含ませた pH 試験紙を鉄筋表面に当てて pH を測定した。鉄筋は除錆後に秤量し、質量減を求めた。なお、鉄筋の腐食量はアノード溶解処理による減量を除いて計算した。また、暴露 1 年後に鉄筋表面から最大 5mm までのコンクリートを採取し、全塩分量を JIS A 1154 により求めた。

単鉄筋供試体の実験状況を図-4.3 に示す。

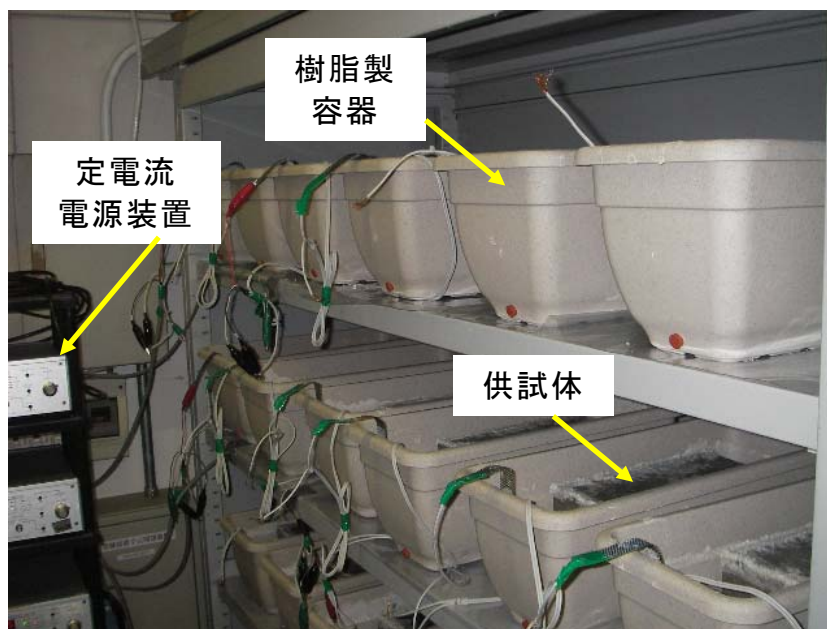


図-4.3 単鉄筋供試体の実験状況

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 自然電位におよぼすさび層および湿潤条件の影響

##### (1) アノード溶解処理

アノード溶解処理後における鉄筋の腐食量を求めた。塩化物を添加しない供試体の鉄筋は、アノード溶解処理をしても  $10.4\text{g/m}^2$  (No.9～No.11 の平均値) とわずかしこ腐食しなかった。これは、塩化物イオンがないために鉄筋表面が不動態化し、電流が酸素ガス発生反応に消費されたものと考えられる。一方、塩化物を添加した供試体では、かぶりが 20 mm および 42mm でそれぞれ  $266.6\text{g/m}^2$  (No.26～No.31 の平均値) および  $217.9\text{g/m}^2$  (No.46～No.51 の平均値) ほど腐食し、計算値の  $208.4\text{g/m}^2$  よりも大きな値を示した。これはコンクリートを打設してからアノード溶解処理終了までの約 2 ヶ月間に鉄筋に腐食が生じたためと考えられる。

腐食状況の代表例として No.27 Cl:10-20mm の鉄筋上側面および下側面の状況を図-4.4 に示す。腐食は部分的に生じ、金属光沢のある健全な箇所が残っていた。これは、コンクリート中の空隙などと鉄筋が接する部分ではセメントアルカリの供給が他の部分よりも悪く、それらが起点となって選択的に腐食したためと考えられる。腐食生成物の色は黒色および赤褐色であった。腐食グレードはコンクリート標準示方書[維持管理編]の「IV：断面欠損が生じている」であった。



(a) 鉄筋上側面



(b) 鉄筋下側面

図-4.4 アノード溶解処理後

##### (2) 自然電位の経時変化

乾湿条件での自然電位の経時変化を図-4.5 に示す。

塩化物を添加しない、かぶり 20mm の供試体 No.5 の自然電位は暴露初期から  $-200\text{ mV vs. CSE}$  程度の貴な値を示したが、暴露 257 日後から  $-500\text{ mV vs. CSE}$  より卑な値に変化した。これは、暴露初期では鉄筋表面が不動態域にあったが、暴露期間中に浸透した塩化物イオンによって不動態被膜が破壊され、腐食域に移行したためと考えられる。

塩化物を含む供試体 No.20 および No.43 の自然電位は、乾燥時期を除いて  $-780 \sim -530\text{ mV vs. CSE}$  の範囲で卑な値を示した。これはコンクリートが湿潤な状態では酸素の供給速度が遅く、酸素拡散限界によって電位が卑になったと考えられる。一方、暴露 100 日後をピークとする乾燥時期の自

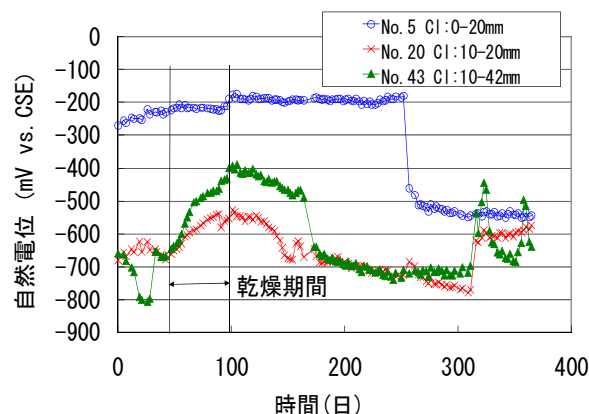


図-4.5 乾湿条件での自然電位

然電位は、かぶり 20mm の No.20 で  $-530 \text{ mV vs. CSE}$  まで、かぶり 42mm の No.43 で  $-400 \text{ mV vs. CSE}$  まで貴になった。これは、コンクリートが乾燥することによって酸素の供給速度が速くなり、陰分極が活性化分極に戻って腐食電流が増加した結果、自然電位がカソードの方向に変化したものと考えられる。ここで、かぶり 20mm の No.20 の方が乾燥しやすく、より貴な自然電位を示すことが予想されたが、かぶり 42mm の No.43 より卑な値を示した。これは、No.20 の活性なアノード面積が No.43 より広がったために実質のアノード電流密度がより低くなり、陽分極が少なくなったものと推定された。

### (3) 浸漬条件での自然電位

浸漬条件での自然電位の経時変化を図-4.6 に示す。塩化物を添加しないかぶり 20mm の供試体 No.8 の自然電位は暴露初期に約  $-250 \text{ mV vs. CSE}$  の貴な値を示したが、暴露 26 日後から約  $-650 \text{ mV vs. CSE}$  まで卑になった。さらに 150 日後には、約  $-1,000 \text{ mV vs. CSE}$  まで卑に変化した。供試体 No.8 の自然電位が乾湿条件の No.5 よりも早く卑になった理由として、コンクリートが湿潤なために、強固な不動態皮膜の形成に必要な酸素の供給速度が遅く、塩化物イオンが鉄筋表面に到達する以前の不動態被膜が弱かったためと考えられる。

供試体 No.8 の鉄筋表面の pH は、後述する表-4.4 に示すように鉄筋がほとんど腐食していなかったことおよび pH 試験紙による測定で pH が 10 以上であったことから、加水分解が生じずにコンクリートと同じ pH13 程度であったと考えられる。この pH で No.8 が約  $-650 \text{ mV vs. CSE}$  の電位を示したのは、残存する酸素の平衡電位と、2.2 節で述べた電位-pH 図における  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の平衡電位との混成電位を示したと考えられる。自然電位が 150 日後に約  $-1,000 \text{ mV vs. CSE}$  の卑な値に変化した理由は、鉄筋が微量に腐食する際にコンクリート中に残存した酸素を消費し、電位が 2.2 節で述べた電位-pH 図における  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  との平衡電位や、水素の平衡電位に近づいたためと考えられる。なお、pH13 における水素の平衡電位 E を第 2 章の式(2.2)から計算すると  $-1,084 \text{ mV vs. CSE}$  となり、150 日後の自然電位と同様な値であった。

塩化物を含む供試体 No.25 および No.45 の自然電位は、暴露初期に約  $-650 \text{ mV vs. CSE}$  の値であったが、その後徐々に卑化し、約 70 日後からは  $-900 \text{ mV vs. CSE}$  で安定した。これらの鉄筋表面における pH は、後述する表-4.4 の結果から pH8~pH9 であったことから、上記と同様に図-2.1 に示す  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  との平衡電位や、水素の平衡電位に近づいたと考えられる。

このように浸漬条件において、わずかでも腐食した鉄筋は、 $-900 \text{ mV vs. CSE}$  程度の卑な値を示すことを明らかにした。

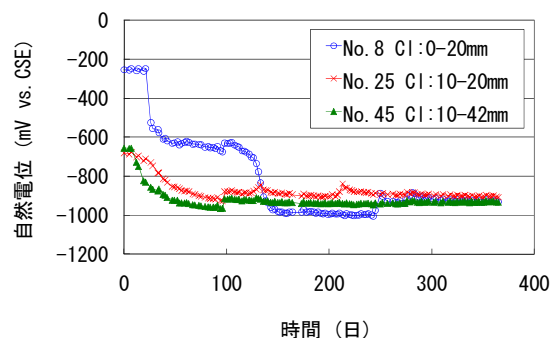


図-4.6 浸漬条件での自然電位



## 4.3.2 湿潤条件に適した防食基準の検討

乾湿条件および浸漬条件におけるインスタントオフ電位ならびに復極量の結果から、湿潤条件に適した防食基準を検討した。

## (1) 乾湿条件において復極量 100mVで通電した場合

乾湿条件で、復極量が 100mV 以上になるように電流を調整した場合のインスタントオフ電位の経時変化を図-4.7 に示す。また、そのときの電流密度を図-4.8 に、復極量の結果を図-4.9 に示す。

塩化物を添加しない、かぶり 20mm の供試体 No.2 の復極量は、図-4.9 に示すように 150 日後の測定において復極量が 100mV をわずかしこ超えていなかったため、その後の復極量を確保するために図-4.8 に示すように 161～220 日の期間に電流密度を高めた。インスタントオフ電位は、図-4.7 に示すように、この期間を除いて  $-420\text{mV vs. CSE}$  より貴な値を示したことから、鉄筋表面は不動態域にあったと考えられる。このときの防食電流密度は  $0.1\text{mA/m}^2$  と非常に低かった。また、復極量は図-4.9 に示すように暴露期間中 100mV を超えていた。4.3.1(1)項で述べたように、塩化物を添加しない供試体の鉄筋はアノード溶解処理によってわずかしこ腐食しなかったことから、さび層をほとんど有さない鉄筋を電気防食する場合は低い電流密度で復極量 100mV を満足できることが明らかになった。

このことから、塩害環境に置かれる新設構造物に電気防食を予防保全的に適用すれば、補修のための足場工、断面復旧工が省けるほか、陽極システムへの負担が少なくなるなどの利点が期待できる。

さび層を有する No.14 および No.39 のインスタントオフ電位は、暴露 70 日後から 160 日後までの乾燥時期およびその後の間欠的な乾燥時に  $-500\text{mV vs. CSE}$  より貴な値であ

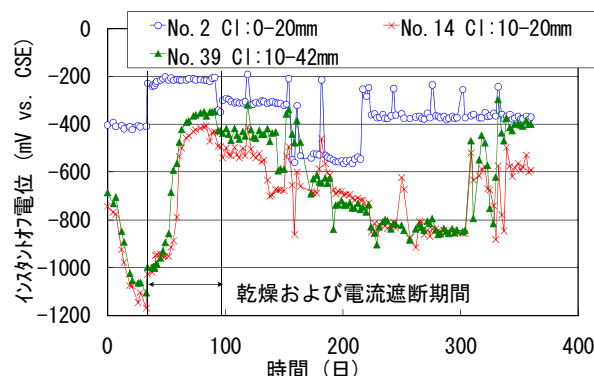


図-4.7 乾湿条件でのインスタントオフ電位 (復極量 100mV)

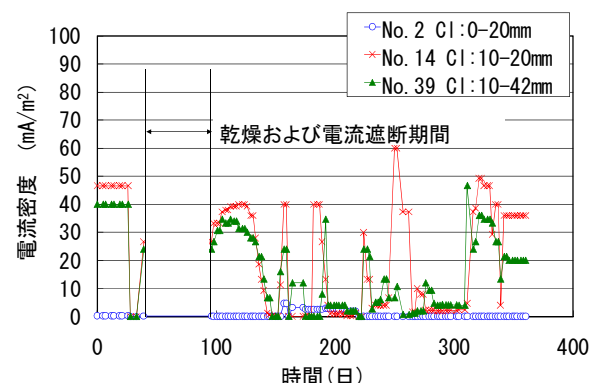


図-4.8 乾湿条件での電流密度 (復極量 100mV)

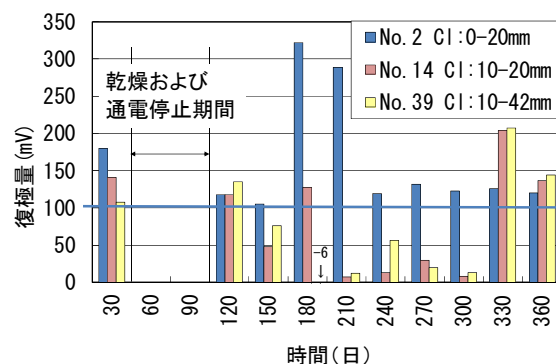


図-4.9 乾湿条件での復極量 (復極量 100mV)



った。また、これらの時期の電流密度は  $20 \sim 60 \text{ mA/m}^2$  の範囲で高い値を示した。一方、比較的湿潤な時期（例えば、192～241 日後や 257～302 日後）のインスタントオフ電位は  $-900 \sim -600 \text{ mV vs. CSE}$  の範囲で卑な値を示し、電流密度は  $1.0 \text{ mA/m}^2$  程度の低い値を示した。これは乾燥時に酸素が鉄筋に到達し、酸素の還元反応や、酸素によって酸化された三価の鉄さびの還元反応[4.10],[4.11],[4.12]によって防食のための高い電流密度が必要になったと考えられる。一方、コンクリートが湿潤になると酸素の供給速度が低下し、上記の還元物質が少なくなる結果、低い電流密度で防食基準を満足したと考えられる。このように、乾湿条件ではさび層の還元反応と酸化反応が繰り返され、触媒的な作用によってさび層が防食電流密度に影響をおよぼすことが示唆された。一般に、腐食速度が速いとそれに見合う防食電流密度は高くなるので、さび層の還元反応速度が腐食速度に影響しているとも考えられる[4.13]。さびの還元反応および酸化反応の例を式(4.1)および式(4.2)に示す。

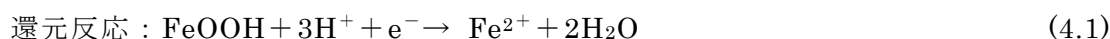


図-4.9 に示すように、さび層を有する供試体 No.14 および No.39 は約 6 ヶ月間、防食基準「復極量  $100 \text{ mV}$ 」を満足しなかった。これは乾湿条件においてコンクリートの乾燥が不十分な場合に復極量を得るための電流調整が困難で、十分な防食電流を供給できなかったことが主な原因と考えられる。

## (2) 乾湿条件において電位 $-850 \text{ mV}$ で通電した場合

乾湿条件で、電位が  $-850 \text{ mV}$  より卑になるように電流を調整した場合のインスタントオフ電位の経時変化を図-4.10に示す。また、そのときの電流密度を図-4.11に示す。

塩化物を添加しない、かぶり  $20 \text{ mm}$  の供試体 No.4 のインスタントオフ電位は暴露 180 日後～280 日後において  $-1,170 \sim -510 \text{ mV vs. CSE}$  の範囲で上下に変動した。このときの電流密度は  $0.02 \sim 3.3 \text{ mA/m}^2$  の範囲で低い値を示した。これは電気防食による還元反応が、乾燥時に酸素還元反応、湿潤時に水素イオン還元反応となり、それぞれの電位を交互に示したためと考えられる。

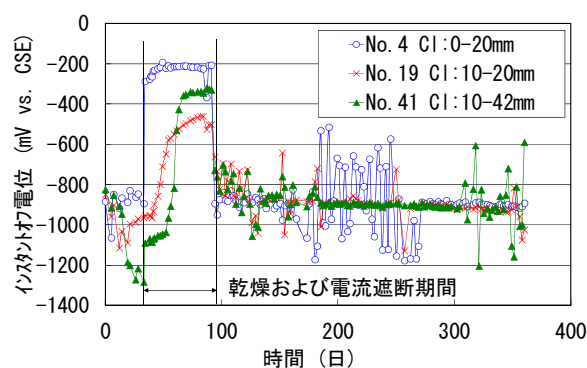


図-4.10 乾湿条件でのインスタントオフ電位（電位  $-850 \text{ mV}$ ）

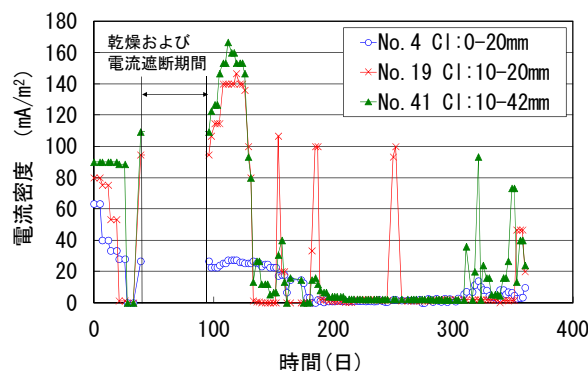


図-4.11 乾湿条件での電流密度（電位  $-850 \text{ mV}$ ）

さび層を有する供試体No.19およびNo.41の電流密度は、暴露開始から31日後までの期間と60日間の乾燥および電流遮断期間の後で、 $80\sim 170\text{mA/m}^2$ の範囲で非常に高い値を示した。これは前述したように、防食電流がさび層の還元反応に消費されたためと考えられる。ここで、後述する表-4.4のNo.19およびNo.41の供試体割裂直後における腐食部でのpHが7および8であったことから、鋼材表面のpHが7まで低下していたとしても、水素イオンの還元電位は式(2.2)から $-730\text{mV vs. CSE}$ と計算され、それよりも卑な $-850\text{mV vs. CSE}$ では水素イオンの還元反応も生じたと考えられ、さび層を有し、かつ表面のpHが低い場合はこれらの還元反応によって所要の防食電流密度が高くなると考えられる。しかし、140日後からは電流密度が $2\sim 20\text{mA/m}^2$ の範囲に低下した。これは高電流密度の通電によってさび層の還元が進み、式(2.11)に示すような還元反応によって水素イオン $\text{H}^+$ が消費されることでpHが高くなり、鉄筋表面の還元物質の活量が低下したためと考えられる。このことは、さび層を有する鉄筋を電気防食する場合は、初期に高い電流密度が必要であり、ある程度通電を続けることによって低い電流密度で防食できるようになることを示唆している[4.13]。このことを図-2.1の電位-pH図で説明すると、長期間の電気防食によって腐食部の表面状態が、②腐食域→③不活性態域→④不完全不動態域→①不動態域へと変化することになる。

### (3) 浸漬条件において電位 $-850\text{mV}$ で通電した場合

浸漬条件で、電位が $-850\text{mV}$ より卑になるように電流を調整した場合のインスタントオフ電位の経時変化を図-4.12に示す。また、そのときの電流密度を図-4.13に示す。

塩化物を添加しない、かぶり $20\text{mm}$ の供試体No.7のインスタントオフ電位は、暴露開始から31日後までの期間、および電流遮断期間の後に $-1,200\sim -500\text{mV vs. CSE}$ の範囲で大きく変動した。これは、図-4.5で述べたように、鉄筋表面が健全であったために低電流密度時に電位が貴化したものと考えられる。電流密度は暴露初期に $87\text{mA/m}^2$ と高かったが暴露約120日後からは $0.05\text{mA/m}^2$ 以下まで低下した。初期に電流密度が高かったのは、アノード溶解処理を行った際に鉄筋表面にわずかに生じた三価の鉄酸化物が還元されたためと考えられる。

さび層を有する供試体No.24およびNo.44の電流密度は、暴露初期に約 $80\sim 150\text{mA/m}^2$ の範囲で非常に高かったが、その期間は短か

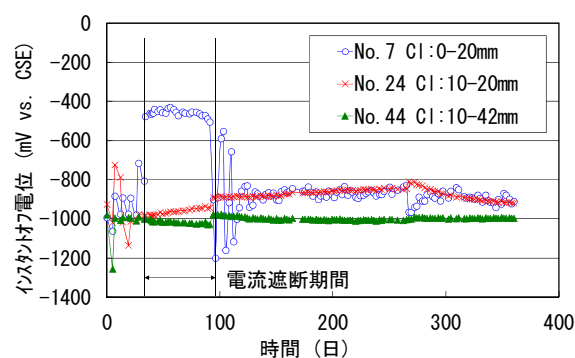


図-4.12 浸漬条件でのインスタントオフ電位 (電位 $-850\text{mV}$ )

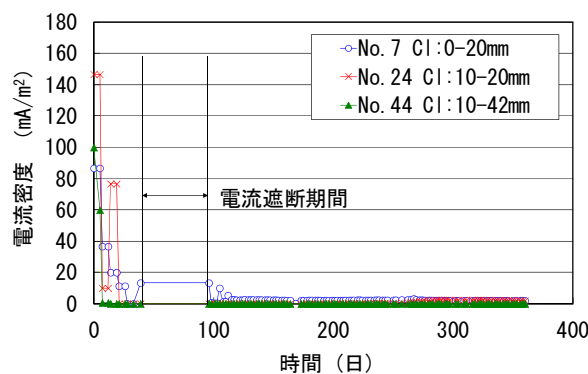


図-4.13 浸漬条件での電流密度 (電位 $-850\text{mV}$ )

った。これは、浸漬条件では酸素の供給速度が遅いので酸素によるさび層の酸化反応が生じなかったためと考えられる。このように、酸素の供給速度が遅い条件では低い電流密度で防食基準「電位－850mV」を達成できることを明らかにした。

#### 4.3.3 供試体解体調査の結果

供試体解体後に行った調査の結果を表-4.4に示す。

##### (1)鉄筋の腐食と表面状態

塩化物を添加しない供試体では、いずれの鉄筋もわずかしき腐食しなかった。塩化物を添加した供試体内、乾湿条件では、さびの色が赤褐色、黒色および緑色であった。腐食面積率は80～95%の範囲にあり5～20%の健全部を残す部分的な腐食であった。

鉄筋表面のpHは狭い腐食部（おおよその面積が25mm<sup>2</sup>未満で、深さが0.3mm以上）で最も低く、次に広い腐食部（その他の腐食部）および健全部の順に高かった。特に、狭い腐食部では腐食量が200g/m<sup>2</sup>以上の場合にpH4程度の低い値を示した。これは2.4節で述べた

表-4.4 供試体解体後の鉄筋の表面性状および腐食量の結果

塩化物の添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	鉄筋のかぶり (mm)	暴露条件	防食基準	暴露期間 <sup>1)</sup> (年)	供試体 番号 No.	鉄筋の腐食量, 表面性状			鉄筋表面のpH		
						質量減 <sup>2)</sup> (g/m <sup>2</sup> )	腐食面積 率(%)	さびの色 <sup>3)</sup>	狭い 腐食部 <sup>4)</sup>	広い 腐食部 <sup>5)</sup>	健全部
0		乾湿	復極量100mV	0.5	1	Neg.	—	—	—	—	10以上
				1	2	Neg.	—	—	—	—	10以上
			電位－850mV	0.5	3	Neg.	—	—	—	—	10以上
				1	4	Neg.	—	—	—	—	10以上
			無防食	1	5	3	—	—	—	—	10以上
				0.5	6	11	—	—	—	—	10以上
		浸漬	電位－850mV	1	7	Neg.	—	—	—	—	10以上
			無防食	1	8	5	—	—	—	—	10以上
10	20	乾湿	復極量100mV	1	14	215	83.8	Br / Bl	4～5	9	10
					15	198	87.6	Br / Bl / Gr	5	7～8	10
				0.5	16	267	87.0	Br / Bl / Gr	4	7	10
					17	213	89.3	Br / Bl / Gr	5	7	10
			電位－850mV	0.5	18	109	86.9	Br / Bl	—	8～9	10
				1	19	108	80.2	Br / Bl	—	8	10
			無防食	1	20	288	80.8	Br / Bl / Gr	4～5	9～10	9～10
					21	235	85.2	Br / Bl / Gr	4～5	9	9
				0.5	22	196	82.0	Br / Bl / Gr	4	6～7	10
					23	240	87.6	Br / Bl / Gr	4	5～6	10
		浸漬	電位－850mV	1	24	Neg.	83.4	Bl / Gr	7	8～9	—
			無防食	1	25	Neg.	85.3	Bl / Gr	6	8～9	—
	42	乾湿	復極量100mV	0.5	38	165	92.4	Br / Bl / Gr	4	5	10
				1	39	162	95.0	Br	—	8	10
			電位－850mV	0.5	40	140	88.5	Br / Bl	8～9	8～9	10
				1	41	144	90.7	Br / Bl	7	8	10
			無防食	0.5	42	208	92.0	Br / Bl / Gr	4	8～9	—
				1	43	127	90.0	Br / Bl / Gr	5～6	8	9～10
		浸漬	電位－850mV	1	44	Neg.	87.0	Bl / Gr	5	7	10
			無防食	1	45	Neg.	89.1	Bl / Gr	—	8～9	8～9

< 注 >

1) ”暴露期間”は電気防食のための通電を開始したときを起点とした年数

2) ”Neg.”は微量を表す

3) ”さびの色”—Br：赤褐色，Bl：黒色，Gr：緑色

4) ”狭い腐食部”—おおよその面積が25mm<sup>2</sup>未満で、深さが0.3mm以上

5) ”広い腐食部”—上記以外の腐食部

ような加水分解によるものと考えられる。

## (2) かぶり 20mmにおける腐食量

乾湿条件および浸漬条件における、かぶり 20mm での腐食量の結果を図-4.14 に示す。乾湿条件で、復極量が 100mV 以上になるように電流調整した供試体の腐食量は、暴露 0.5 年後 (No.16, No.17) で  $267 \text{ g/m}^2$  および  $213 \text{ g/m}^2$ 、暴露 1 年後 (No.14, No.15) で  $215 \text{ g/m}^2$  およ

び  $198 \text{ g/m}^2$  となり、ほぼ同様な値を示したことから、腐食量が暴露期間に依存しなかったと考えられる。一方、無防食供試体の腐食量は、暴露期間 0.5 年 (No.22, No.23) および 1 年 (No.20, No.21) でそれぞれ  $196 \text{ g/m}^2$  および  $240 \text{ g/m}^2$  から、 $288 \text{ g/m}^2$  および  $235 \text{ g/m}^2$  まで増加した。これらのことから、暴露 0.5 年後から 1 年後までの期間において電気防食の効果が認められた。

復極量は図-4.9 の No.14 に示すように暴露 0.5 年後から 1 年後までの期間 (約 4 ヶ月間) に、防食基準である 100mV を満足しなかった。しかし、図-4.14 の結果からは、防食効果が認められた。これは、コンクリートが湿潤な時期は酸素の供給速度が低下して復極量が得られないものの、腐食速度も低下したためと考えられる。

アノード溶解処理終了から 0.5 年間では、表-4.2 に示すように、暴露準備 23 日間および乾燥のための不通電の 60 日間があったため、この期間に鉄筋が腐食したと考えられる。この期間が全期間に占める比率は  $0.35 (= (23+60) \div (23+60+155))$  であることから、鉄筋が一定の速度で腐食したとして、No.23 の結果  $240 \text{ g/m}^2$  から不通電期間の腐食量を計算すると  $84 \text{ g/m}^2$  になる。以下、この値を BLK20 (ブランク 20 と呼ぶ) とした。供試体 No.16 の腐食量  $267 \text{ g/m}^2$  から BLK20 を減じて、暴露 155 日間の腐食量を求めると  $183 \text{ g/m}^2$  と大きな値となった。これは、通電時間が短かったことから、鉄筋表面で pH 上昇などの環境改善が進まなかったためと考えられる。

乾湿条件で、電位が  $-850 \text{ mV}$  より卑になるように電流調整した供試体 No.18 の腐食量は、暴露 0.5 年後で  $109 \text{ g/m}^2$  であり BLK20 を減じると、上記暴露 155 日間の腐食減量は  $25 \text{ g/m}^2$  となり、「復極量 100mV」よりも防食効果が高かった。これは、図-4.11 に示すように、この期間に十分に高い電流密度で防食電流を供給したためと考えられる。このことから、復極量を得にくい湿潤環境では、防食基準「電位  $-850 \text{ mV}$ 」が適していることが明らかになった。ただし、さび層がある場合は暴露初期に  $80 \sim 170 \text{ mA/m}^2$  程度の非常に高い電流密度が必要なことに留意しなければならない。

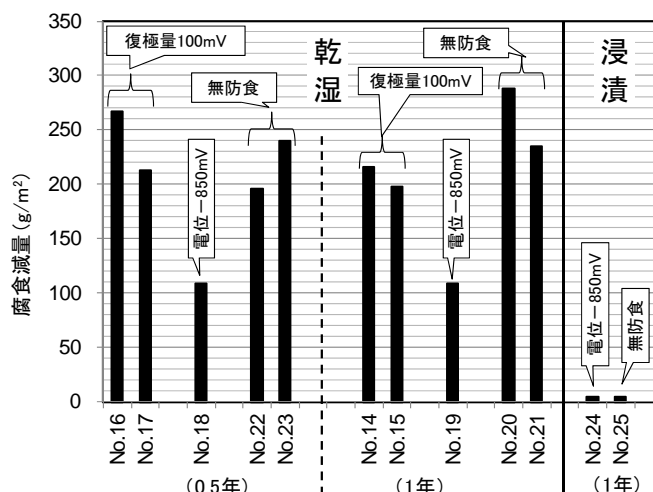


図-4.14  $\text{Cl}:10 \text{ kg/m}^3$ 、かぶり 20mm での腐食減

浸漬条件で、電位が $-850\text{mV}$ より卑になるように電流調整した供試体の腐食量は、防食または無防食にかかわらず微量であった。これはコンクリートが湿潤なために酸素の供給速度が遅かったためと考えられる。このように、湿潤なコンクリート中の鉄筋は単独では腐食しにくい。しかし、実構造物では、湿潤部の鉄筋が通気性の良いコンクリート中の鋼材と電気的に接続するので、湿潤部がマクロセルのアノードとなって腐食する可能性が高い。このような場合もマクロセルの電位差を少なくできる電気防食が有効であると考えられる。

### (3) かぶり 42mm における腐食量

乾湿条件および浸漬条件で、かぶり 42mm における腐食量の結果を図-4.15 に示す。

乾湿条件で、復極量が  $100\text{mV}$  以上になるように電流調整した供試体の腐食量は、暴露 0.5 年後 (No.38) で  $165\text{g/m}^2$ 、暴露 1 年後 (No.39) で  $162\text{g/m}^2$  とほぼ同様な値を示し、腐食量が暴露期間に依存しなかったと考えられる。また、無防食供試体の腐食量は暴露期間 0.5 年 (No.42) および 1 年 (No.43) でそれぞれ  $208\text{g/m}^2$  および  $127\text{g/m}^2$  であり増加しなかった。このことから、かぶり 42mm では暴露 0.5 年後から 1 年後の期間は、無防食または電気防食にかかわらず腐食の進行は遅かったと考えられる。これは、かぶりが 42mm と比較的に大きいことから、かぶり 20mm に比較して酸素の供給速度が遅かったためと考えられる。

アノード溶解処理終了から 0.5 年間ににおける不通電期間の腐食量 BLK42 を供試体 No.42 の結果  $208\text{g/m}^2$  から、かぶり 20mm と同様に計算すると  $73\text{g/m}^2$  となった。供試体 No.38 の腐食量  $165\text{g/m}^2$  から BLK42 を減じて暴露 155 日間の腐食減量を求めると  $92\text{g/m}^2$  となり、かぶり 20mm における計算値  $183\text{g/m}^2$  のおよそ半分になったものの、腐食量は少なくなかった。これは、かぶり 20mm と同様に、通電時間が短かったことから、鉄筋表面の pH 上昇などの環境改善が進まなかったため、腐食が進行したものと考えられる。

乾湿条件で、電位が $-850\text{mV}$ より卑になるように電流調整した供試体の腐食量は、暴露 0.5 年後 (No.40) で  $140\text{g/m}^2$  であり、BLK42 を減じると  $67\text{g/m}^2$  となり、かぶり 20mm の場合の  $25\text{g/m}^2$  よりも大きくなった。これは、図-4.10 の No.41 の結果から、60 日間の乾燥後にインスタントオフ電位が $-850\text{mV}$  vs.CSE よりも貴になったこと、および図-4.11 の No.41 に示すように、60 日間の乾燥後に、かぶりが大きいにもかかわらずより高い電流密度が必要だったことから、乾湿サイクルの浸漬時においても浸漬液が、かぶりコンクリート中に十分に浸透せず、供試体内部に残存した酸素によって腐食が進行したものと考えられる。

浸漬条件で、電位が $-850\text{mV}$ より卑になるように電流調整した供試体の

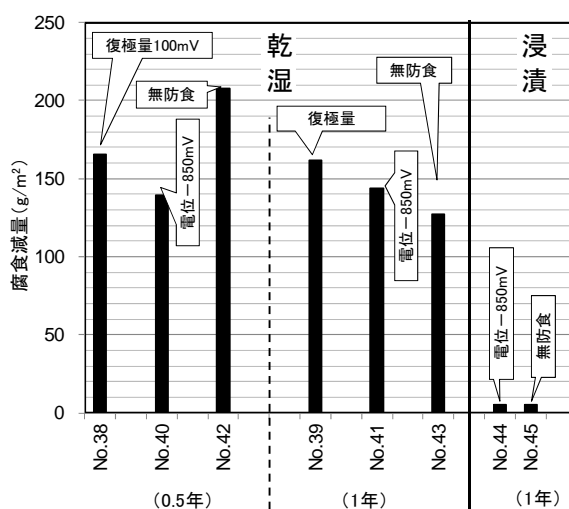


図-4.15  $\text{Cl}:10\text{kg/m}^3$ , かぶり 42mm での腐食減量

腐食量は、防食または無防食にかかわらず微量であった。これはコンクリートが湿潤なために酸素の供給速度が遅かったことによると考えられる。

#### 4.3.4 鉄筋近傍のコンクリート中塩化物イオン濃度

暴露1年後における、鉄筋表面から最大5mmまでのコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果を図-4.16に示す。

塩化物を添加しない供試体では、乾湿条件および浸漬条件において、塩化物イオン濃度は $3.1\sim 5.3\text{ kg/m}^3$ の範囲にあり、いずれも発錆限界とされる $1.2\text{ kg/m}^3$ を超えていた。このことから、かぶりが20mmでは1年間の暴露期間内に浸漬液からの塩化物イオンが鉄筋表面に到達したことが明らかになった。なお、電気防食による塩化物イオン濃度の低下が期待されたが、通電による明らかな影響は認められなかった。これは、図-4.8、図-4.11および図-4.13に示すように電流密度が非常に低く、通電電気量が少なかったためと考えられる。

乾湿条件で、塩化物を添加したかぶり20mmの供試体の塩化物イオン濃度は $19.9\sim 23.0\text{ kg/m}^3$ となり、添加量の $10\text{ kg/m}^3$ を超えていた。また、電気防食した供試体の塩化物イオン濃度は無防食のものより低かった。これは、電気防食によってマイナス電荷の塩化物イオンが鉄筋表面から離れたため、鉄筋表面における濃度はさらに低いと考えられる。これらの通電電気量は「復極量100mV」No.14で $155\text{ Ah/m}^2$ 、「電位-850mV」No.19で $212\text{ Ah/m}^2$ であった。このように、電気防食によって電流を流し続けることで鉄筋表面の塩化物イオン濃度を低下させ、鉄筋の環境を改善できる[4.14]ことが明らかになった。

乾湿条件で、塩化物を添加したかぶり42mmの供試体の塩化物イオン濃度は $9.4\sim 12.3\text{ kg/m}^3$ の範囲にあり、添加量の $10\text{ kg/m}^3$ とほぼ同様な値を示した。また、電気防食した供試体の塩化物イオン濃度は、かぶり20mmと同様に、無防食供試体より低かった。

浸漬条件で、塩化物を添加したかぶり20mmの供試体の塩化物イオン濃度は、電気防食で $21.0\text{ kg/m}^3$ 、無防食で $16.8\text{ kg/m}^3$ となり、どちらも添加量の $10\text{ kg/m}^3$ を超え、電気防食による影響が認められなかった。これは、図-4.13のNo.24に示すように、期間中の電流密度が低かったためと考えられる。

浸漬条件で、塩化物を添加したかぶり42mmの供試体において、塩化物イオン濃度は、電気防食で $12.6\text{ kg/m}^3$ 、無防食で $12.7\text{ kg/m}^3$ となり、どちらも添加量の $10\text{ kg/m}^3$ とほぼ同様な値を示した。この場合も上記と同じ理由で、電流密度が低かったために塩化物イオン濃度が低下しなかったと考えられる。

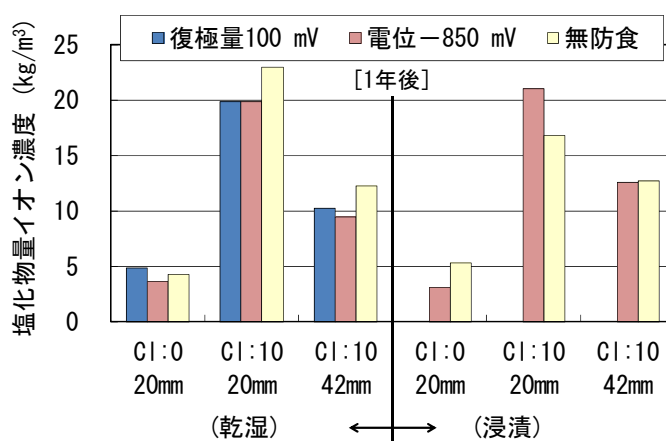


図-4.16 通電1年後における塩化物イオン濃度

#### 4.4 まとめ

本実験では、鉄筋を硬化コンクリート中でアノード溶解処理して強制的に腐食させ、実環境に近い状態で、鉄筋の電位および腐食速度におよぼす表面性状ならびにコンクリート特性の影響を調べた結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 湿潤環境にあるコンクリート中で腐食した鉄筋は、 $-1,000 \sim -800\text{mV vs. CSE}$ の卑な自然電位を示した。これは、酸素の供給速度が遅かったために自然電位がアノード部の電位、または水素の平衡電位に近づくためと考えられた。
- (2) コンクリート中であっても、塩化物を含む供試体中鉄筋の腐食部はpH4程度の酸性を示した。
- (3) 湿潤環境において、防食基準「復極量  $100\text{mV}$ 」では復極量が得にくく、電流調整が困難であった。
- (4) 湿潤環境において、防食基準「電位  $-850\text{mV}$ 」では明らかな防食効果が認められたこと、および、電流調整が容易であったことから、防食基準として適していると考えられた。
- (5) コンクリート中の鋼材表面にさび層がある場合は電気防食の初期に  $80 \sim 170\text{mA/m}^2$ 程度の非常に高い電流密度が必要であることを明らかにした。
- (6) 乾湿条件においては、鋼材表面のさび層は酸素による酸化反応と防食電流による還元反応を繰り返し生じると考えられた。

## 第4章の参考文献

- [4.1] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，  
pp.179-203，1994.10
- [4.2] 井川一弘，山本悟，坂本浩之：コンクリート中の鉄筋防食に関する試験，土木学会第  
43回年次学術講演会，pp.272-273，1988.10
- [4.3] 佐藤唯，皆川浩，久田真，山本誠，若杉三紀夫：鉄筋コンクリートの電気防食におけ  
る鉄筋のカソード分極特性の温度依存性に関する検討，土木学会第65回年次学術講演  
会，pp.621-622，2010.9
- [4.4] 川俣孝治，福手勤，阿部正美，峰松敏和：コンクリート構造物干満帯部への電気防食  
法の適用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.831-836，  
1996
- [4.5] 木村哲士，中野松二，山路徹，審良善和，濱田秀則，高橋良輔：RC 栈橋干満帯部の電  
気防食における復極挙動に関する検討，土木学会第 62 回年次学術講演会，  
pp.1019-1020，2007.9
- [4.6] JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)－改訂版－，日本コンクリート工学協  
会 pp.29-30，1990.3
- [4.7] 細田喜子，石井浩司，田代賢吉，関博：設置環境を考慮したコンクリート部材の電気  
防食基準に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.1，  
pp.1155-1160，2008
- [4.8] ISO 15589-1: International Standard, Petroleum and Natural Gas Industries –  
Cathodic Protection of Pipeline Transportation Systems – Part 1, On-land Pipelines,  
First Edition, 2003
- [4.9] 関博：鉄筋の腐食による膨張ひびわれの発生機構について，セメント・コンクリート，  
No.458，pp.20-27，1985.4
- [4.10] 三沢俊平：鉄さびの生成機構，防錆管理，pp.408-416，1994. 11
- [4.11] 鈴木茂：鉄さび制御による耐食性鋼の新しい展開の可能性，防錆管理，pp.90-96，  
2009. 3
- [4.12] 西村俊弥，田中賢逸，清水義明：乾湿繰返し環境における炭素鋼のさび形成に与える  
NaCl の影響，鉄と鋼，Vol.81，No.11，pp.49-54，1995
- [4.13] 山本悟，川岡岳晴，田代賢吉：電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用，材  
料，Vol.55，No.11，pp.1016-1020，2006
- [4.14] 山本悟，井川一弘，松島洋，坂本浩行，片脇清士：実橋のコンクリート桁における電  
気防食試験，防錆管理，pp.14-19，1990. 1